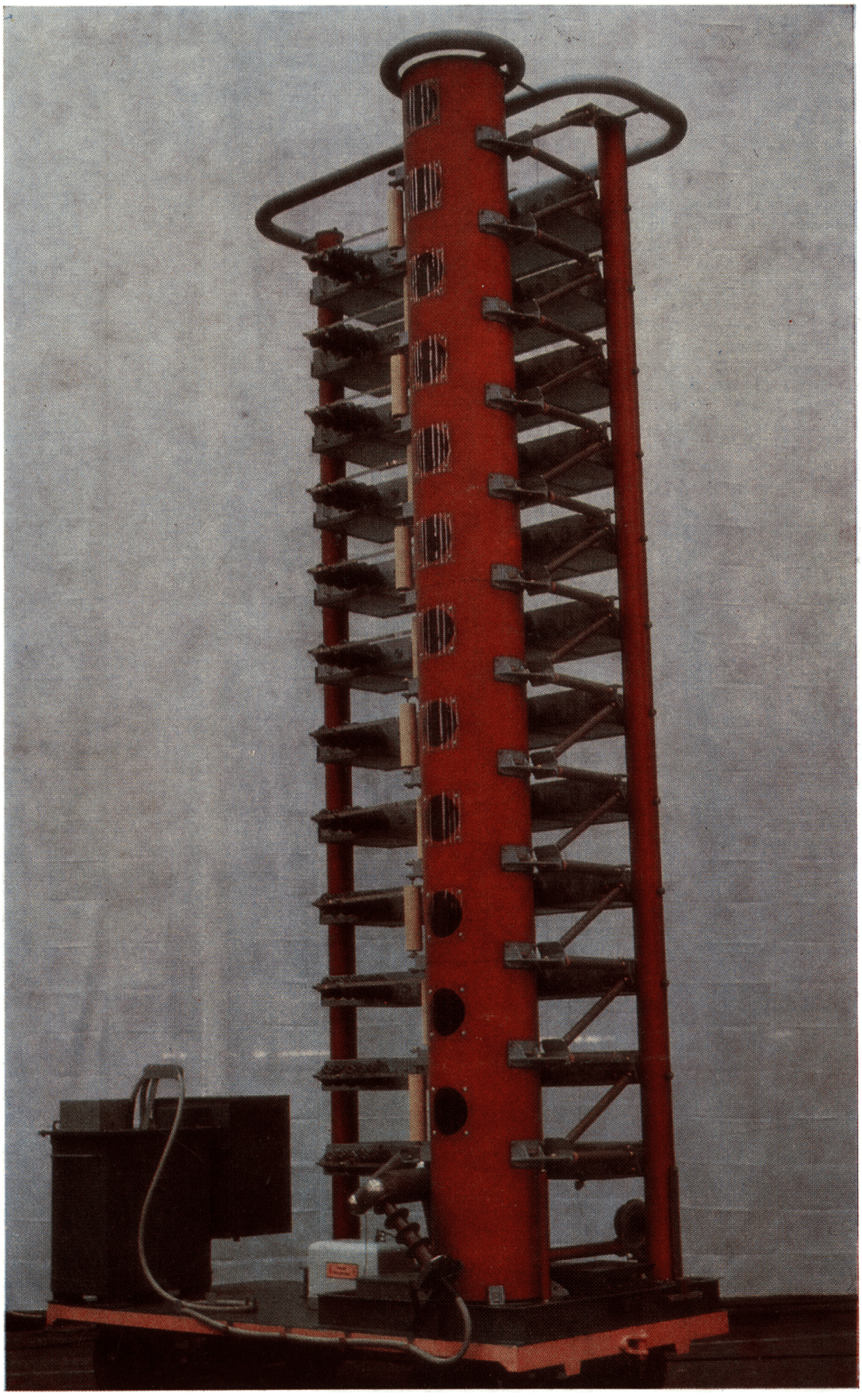
ELEKTRIE

6|86

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN · Postverlagsort für DDR Leipzig · EVP 2,50 Mark · ISSN 0013—5399



TUR DRESDEN

TU DRESDEN

0120300

TECHNISCHE MITTEILUNGEN

TuR – Impulsspannungs-Prüfanlagen Baureihe K

Die neuentwickelte Baureihe K von Impulsspannungs-Prüfanlagen ist nach dem Baukastenprinzip konzipiert und ermöglicht den Aufbau von 40 Prüfgenerator-Grundvarianten im Spannungsbereich von 250 bis 1500 kV bei Ladeenergien von 2,5 bis 60 kJ. Während die Ausführung KN für den Einsatz in Labor und Prüffeld vorgesehen ist (stationär oder verfahrbar), handelt es sich bei der Ausführung KM um Prüfgeneratoren, die zur Prüfung SF_6-isolierter Systeme eine einfache Montage vor Ort gewährleisten.

In Standardausführung sind die Prüfgeneratoren für die Erzeugung von Blitzspannung 1,2/50 und Schaltspannung 250/2500 ausgelegt. Mit zusätzlichen Widerstandssätzen und besonderen Induktivitäten können sowohl aperiodische Prüfspannungen mit anderen Zeitparametern als auch schwingende Blitz- und Schaltspannungen innerhalb eines großen Frequenz- und Dämpfungsbereiches erzeugt werden. Weitere Zusatzbaugruppen dienen zur Prüfung von Transformatoren, zur Impulsstromprüfung von Überspannungsableitern und für andere spezielle Prüfaufgaben.

Während der leistungsstärkste Vertreter der Ausführung KN (1500 kV/60 kJ; Titelbild und Bild 1) die Prüfung elektrischer Betriebsmittel mit Blitz- und Schaltspannung bis zur Isolationsspannung 245 kV ermöglicht, können mit der leistungsstärksten Generatorvariante der Ausführung KM (1000 kV/40 kJ) SF_6-isolierte Systeme beliebiger räumlicher Ausdehnung bis zur Isolationsspannung 765 kV mit schwingenden Impulsspannungen vor Ort geprüft werden.

Auf Grund des übersichtlichen Aufbaus, der Möglichkeit einer vielfältigen Schaltungsvariation und der schnellen Umrüstbarkeit auf eine andere Spannungsform eignen sich die Prüfgeneratoren der Baureihe K für alle Einsatzgebiete der Hochspannungsprüftechnik.

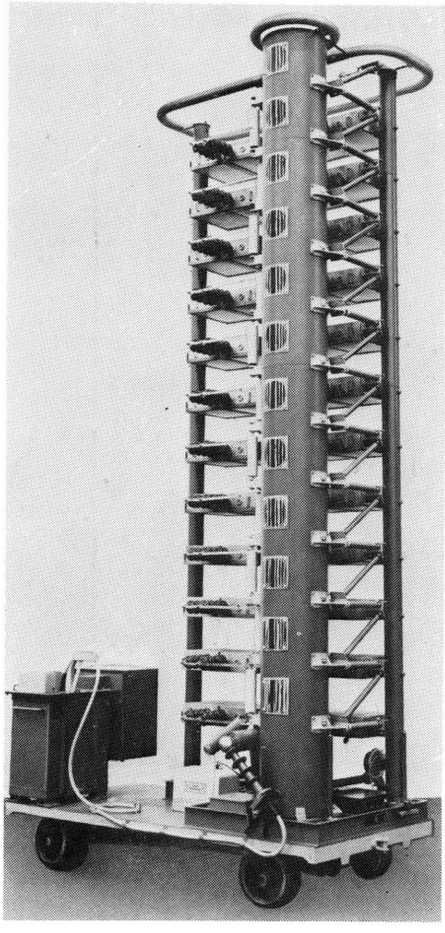


Bild 1
Impulsspannungs-Prüfgenerator 1500 kV/60 kJ einschließlich Gleichspannungserzeuger mit Thyristorteller von TuR-Impulsspannungs-Prüfanlagen der Baureihe K in verfahrbarer Ausführung

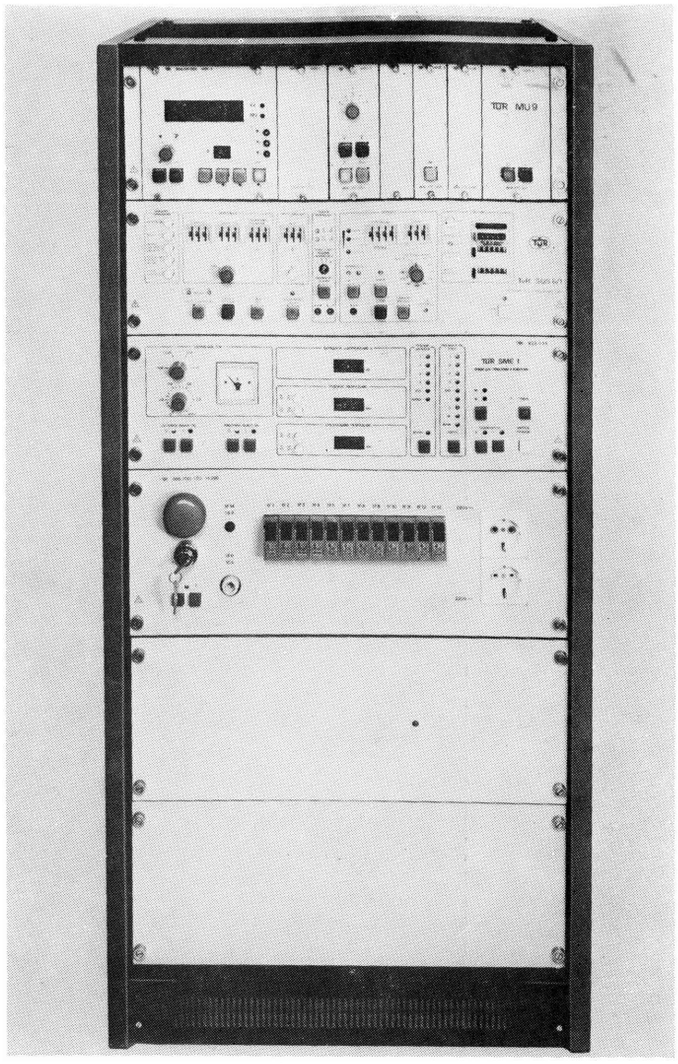


Bild 2. Meß- und Steuerschrank für TuR-Impulsspannungs-Prüfanlagen der Baureihe K

Zusätzlich stehen zur weiteren Vereinfachung der Umschaltarbeiten im Prüfgenerator ein fahrbares Bedienungsgestell mit Widerstandsablagen und separate fahrbare Widerstandsablagen zur Verfügung.

Zur Standardausrüstung jeder Prüfanlage gehört der für die Aufladung des Generators erforderliche Gleichspannungserzeuger einschließlich Thyristorsteller und ein gedämpfter kapazitiver Impulsspannungs-Meßteiler. Zusätzlich stehen schnelle gesteuerte ohmsche Blitzspannungs-Meßteiler zur Verfügung.

Alle Meß- und Steuerfunktionen werden durch eine neuentwickelte Steuerung (Bild 2) realisiert[1]). Sie ermöglicht den halbautomatischen Prüfbetrieb und ist für vollautomatischen Betrieb über einen Mikrorechner vorbereitet.

W. Schrader; Dresden

Ihre Anfragen oder Bestellungen richten Sie bitte an:

VEB Transformatoren- und Röntgenwerk „Herrmann Matern“
Betrieb des VEB Kombinat Automatisierungsanlagenbau
Overbeckstraße 48
Dresden
8030

Exporteur:
AHB Elektrotechnik Export — Import
Alexanderplatz (Haus der Elektrotechnik)
Berlin
1026

[1]) Siehe hierzu den Beitrag „Eine neue Steuerung für Impulsspannungs-Prüfanlagen“ auf den Seiten 225 bis 227 dieses Heftes.

EA 2191

6|86 ELEKTRIE

40. Jahrgang

Wissenschaftlich-technische Zeitschrift der Elektrotechnik

ISSN 0013–5399

Organ des Fachverbands Elektrotechnik der Kammer der Technik

Die Zeitschrift erhielt die Silberne Ehrenplakette der KDT

Redaktionsbeirat

Vorsitzender:

Prof. Dr. sc. techn. J. Vogel

Mitglieder:

Prof. Dr. sc. techn. S. Altmann · Prof. Dr. sc. techn. H. Böhme · Prof. Dr. sc. techn. P.-K. Budig · Dr. sc. techn. G. Burkhard · Dr.-Ing. D. Flügge · Ober-Ing. K. Friedel · Prof. Dr. sc. techn. J. Hoffmann · Dipl.-Ing. H. Kabisch · Prof. Dr.-Ing. habil. R. Lappe · Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e. h. H.-J. Mau · Prof. Dr. phil. habil. G. Mierdel · Dr. rer. nat. K. Möbius · Prof. Dr. sc. techn. E. Muschick · Prof. Dr. sc. techn. V. Pfeiler · Prof. Dr.-Ing. e. h. K. Pommer · Prof. Dr.-Ing. habil. R. Schönfeld · Obering. Dipl.-Ing. N. Wass · Prof. Dr.-Ing. habil. G. Wunsch

Korrespondenten:

Dr.-Ing. K. Hanella, Ilmenau · Dr.-Ing. W. Jordan, Dresden

Titelbild

Das Bild zeigt den Prüfgenerator (teilweise) einschließlich Gleichspannungserzeuger mit Thyristorsteller des leistungsstärksten Vertreters IP 60/1500 KN (1500 kV/60 kJ) der neuen Baureihe K von Impulsspannungs-Prüfanlagen aus dem VEB Transformatoren- und Röntgenwerk „Hermann Matern" in der auf gummibereiften Rädern lenkbaren Ausführung.
Weitere Informationen zu TuR-Impulsspannungs-Prüfanlagen finden Sie auf der 2. Umschlagseite sowie in den Beiträgen auf den Seiten 225 bis 229 in diesem Heft.
Foto: Werkfoto

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN

Träger des Ordens Banner der Arbeit

Inhaltsverzeichnis

Seite

Aktuelle Information 202

Mosch, W.
Hochspannungs-Prüf- und -Meßtechnik in der DDR 203

Hauschild, W.
Druckgasisolierte Schaltanlagen (GIS) — Technologie und Praxis 204

Fachaufsätze

Maucksch, S.; Freitag, W.; Dietrich, M.
Gestaltungsgesichtspunkte für TE-Kabelprüfplätze auf der Basis eines breitbandigen TE-Meßsystems 205

Lemke, E.; Haller, R.
Normalfunkenstrecke zur Überprüfung von Teilentladungs-Meßkreisen bei Hochspannung 208

Menzel, W.; Bärsch, R.; Pilling, J.
Zur Bewertung der Teilentladungsbeständigkeit von Kunststoffisolator-Oberflächen 210

Rausendorf, S.; Schufft, W.
Berechnung des elektrischen Feldes kugelförmiger Teller-Segmentelektroden 213

Pflicke, W.; Lemke, E.
Zur Problematik von Teilentladungen an Teller-Segmentelektroden 217

Schufft, W.; Beyer, J.
Messungen der Durchschlagspannung an einer 2,7-m-Teller-Segmentkugel gegen Ebene unter Freiluftbedingungen 220

Lemke, E.
Vorausberechnung der Durchschlagspannung langer Luftisolierstrecken bei Belastung mit Schaltimpulsspannungen kritischer Stirnzeit 222

Bachmann, H.; Köckritz, M.; Vetters, G.
Eine neue Steuerung für Impulsspannungs-Prüfgeneratoren 225

Thümmler, K.
Digitales Scheitelspannungs-Meßgerät für Gleich- und Wechselspannungen 227

Wolf, J.
Berechnung nichtstationärer Vorgänge in Hochspannungsprüfanlagen 229

Hauschild, W.; Wolf, J.
Statistische Auswertung mit dem Bürocomputer: Ermittlung und Darstellung empirischer Normalverteilungen 231

Umschau

Bücher 237

AKTUELLE INFORMATION

Unkonventionelle Bemessung und Betriebsführung elektrischer Energieanlagen

9. KDT-Kolloquium

Zeit: 18. und 19. November 1986
Ort: IH Zittau
Veranstalter: KDT-Hochschulorganisation der IH Zittau

Das Kolloquium findet in Würdigung der über 15jährigen guten Zusammenarbeit zwischen der Ingenieurhochschule Zittau und dem Kombinat Verbundnetze Energie auf dem Gebiet unkonventioneller Methoden der Dimensionierung und Betriebsführung mit folgender Zielstellung statt.

Inhaltliche Schwerpunkte

Überblick über theoretische Grundlagen, Darstellung realisierter Applikationen, Standortbestimmung zu künftigen Arbeiten und Anwendungsfällen, Diskussion von Thesen zur Erarbeitung eines gemeinsamen Standpunktes innerhalb der DDR zu den Themen

- Stochastische Bemessung und Betriebsführung von Elektroenergieanlagen im Niederspannungs-, Mittelspannungs- und Übertragungsnetz
- Standardrechtliche Grundlagen.

Anfragen

Ingenieurhochschule Zittau
KDT — Fachsektion E
Tel: 61314, 61315, 61301
Theodor-Körner-Allee 16
PSF 261
P. Reinhold, Zittau EA 2255

Wissenschaftlich-technischer Fortschritt und Energiewirtschaft

VIII. Wissenschaftliche Konferenz für Energiewirtschaft

Zeit: 22. bis 24. April 1987
Ort: Ingenieurhochschule Zittau
Veranstalter: Senat und Wissenschaftlicher Rat der IHZ

Inhaltliche Schwerpunkte

Zuverlässige und effektive Energieversorgung der Gesellschaft (Session I)

- Erfordernisse der Leitung, Planung und Ökonomie der gesamtenergiewirtschaftlichen Entwicklung
- Leitung, Planung, Ökonomie und verläßlicher Betrieb von Kohle- und Kernkraftwerken
- Leitung, Planung, Ökonomie und zuverlässiger Betrieb von Wärme- und Gasversorgungssystemen.

Kohle- und Kernkraftwerke (Session II)

- Erhöhung der Effektivität bei der Vorbereitung, Errichtung und dem Betrieb von Kernkraftwerken
- Probleme des effektiven Betriebes und der Rekonstruktion sowie der Schadstoffreduzierung in Kohlekraftwerken
- Effektivitätssteigerungen in der Kraftwerksautomatisierung.

Stabiler Betrieb von Elektroenergieversorgungssystemen (Session III)

- Anlagen- und Systemgestaltung aus der Sicht der Regimesteuerung
- Theoretische und gerätetechnische Lösungen zur Steuerung von Elektroenergieversorgungssystemen
- Dispatcher und Betriebsführung in Elektroenergieversorgungssystemen.

Rationeller Energieeinsatz in industriellen Energieumwandlungs- und Anwendungsanlagen (Session IV)

- Anwendung moderner Technologien zur Senkung des Wärme- und Elektroenergieverbrauchs
- Nutzung von Abwärme und Reduzierung der Umweltbelastung
- Bewertung und Stimulierung von Maßnahmen zum wirtschaftlichen Energieeinsatz.

Instandhaltung und Technische Diagnostik (Session V)

- Schädigungsprozesse und deren Modellierung
- Technische Diagnostik für energietechnisch relevante Schädigungsmechanismen
- Einsatz der Rechentechnik in der Instandhaltung mit besonderer Berücksichtigung des Kleincomputereinsatzes
- Instandhaltungstechnologie und -planung.

Rechnergestützte Arbeit des Ingenieurs und des Ökonomen (Session VI)

- Anwendung in der Erzeugung, Umwandlung und Verteilung von Elektroenergie
- Fragen der informationellen Gestaltung der Lösungsprozesse
- Wege und erste Erfahrungen zur Gestaltung der Aus- und Weiterbildung

Energie und Gesellschaft (Session VII)

- Energieproblem und wissenschaftlich-technischer und sozialer Fortschritt
- Dialektik von Energie-, Umwelt- und Friedenspolitik
- Energieökonomie in der umfassenden Intensivierung — reproduktions-theoretische und -praktische Probleme
- historische und gegenwärtige Fragen der energiewirtschaftlichen Entwicklung.

Wissenschaftliche Rahmenveranstaltungen

- IX. Zittauer Kernenergiegespräch
- Errichtung von Kernkraftwerken
- Rationelle Energieanwendung
- Regimesteuerung von Elektroenergieversorgungsnetzen
- Entwicklungstendenzen in der Verrechnungstechnik für Elektroenergie
- Zur Methodologie der Geschichtsschreibung in der Energiewirtschaft
- Einbindung der Informatik in die Ausbildung von Ingenieuren und Ökonomen der Energiewirtschaft

Anfragen

Prof. Dr. rer. nat. *G. Schumann*
Prorektor für Naturwissenschaften und Technik
Ingenieurhochschule Zittau
Theodor-Körner-Allee 16
Zittau
8800
Telefon: Zittau 610
Telex: 284240 EA 2201

Informationstechnik und Theoretische Elektrotechnik / Physik und Technik elektronischer Bauelemente

32. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium

Zeit: 26. bis 30. Oktober 1987
Ort: Ilmenau
Veranstalter: Technische Hochschule Ilmenau

Inhaltliche Schwerpunkte

Theoretische Elektrotechnik (A 1)

- Elektromagnetische Felder
- Elektrische Netzwerke/Systeme
- Neue physikalische Effekte
- Theorie und Einsatz elektromechanischer Systeme

Schaltungstechnik und elektronische Meßtechnik (A 2)

- Digitale Signalverarbeitung
- Rechnerunterstützte Meßwertverarbeitungssysteme

Nachrichtentheorie (A 3)

- Lichtwellenleiter-Übertragungstechnik
- Lokale Kommunikationsnetze

Mikrowellentechnik

- Mikrowellenschaltungen
- Felder und Wellen auf Leitungen und an Bauelementen

Konstruktive und technologische Probleme elektronischer Funktionsblöcke (A 5)

- Rechnergestützte Konstruktion in der Elektroniktechnologie
- Hybridtechnologie
- Elektroniktechnologie

Ausgewählte Probleme der Informationtechnik (A 6)

- Bildverarbeitung und visuelle Inspektion
- Akustische Signalerkennung
- Computerunterstützter Unterricht

Halbleiter- und Isolatorphysik (B 1)

- Oberflächen, Grenzflächen
- Optische und Transporteigenschaften

Entwurf, Wirkprinzipien, Technologien und Meßverfahren für mikroelektronische Bauelemente und Schaltkreise (B 2)

- Schaltkreisentwurf
- Wirkprinzipien in Bauelementen und Schaltkreisen
- Technologien für Bauelemente und Schaltkreise

Werkstoffprobleme der Mikroelektronik und ihre Analysenmethoden (B 3)

- Phasenumwandlung und Platzwechselvorgänge
- Werkstoffprobleme der VLSI-Technik

Lichttechnik und Optoelektronik (B 4)

- Erzeugung optischer Strahlung
- Messung optischer Strahlung

Anfragen

Technische Hochschule Ilmenau
32. IWK — Vorbereitungskomitee
PSF 327
Ilmenau
6300
B. Friedrich, Ilmenau EA 2231

Hochspannungs-Prüf- und -Meßtechnik in der DDR

Von

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Wolfgang Mosch

Leiter des Wissenschaftsbereiches Hochspannungstechnik der Sektion Elektrotechnik und Dekan der Fakultät Elektrotechnik/Elektronik der Technischen Universität Dresden

Die Hochspannungs-Prüf- und -Meßtechnik (HPMT) ist schon immer sehr eng mit der Elektroenergieversorgung verbunden. Es ergaben sich aber auch ständig neue Einsatzgebiete, so z.B. Aufgaben im Hinblick auf die Gewährleistung der elektromagnetischen Verträglichkeit der in allen Zweigen unserer Volkswirtschaft immer umfangreicher eingesetzten Mikroelektronik.

Eine besondere Bedeutung kommt der HPMT in der DDR im Zusammenhang mit dem
„Komplexprogramm des wissenschaftlich-technischen Fortschritts der Mitgliedsländer des RGW bis zum Jahre 2000"
zu, das die Länder des RGW auf ihrer 41. Tagung im Dezember 1985 beschlossen haben.
Es gilt in noch stärkerem Maße als bisher, die in den einzelnen Ländern vorhandenen wissenschaftlichen Erkenntnisse und Spitzentechnologien gemeinsam zu nutzen. Die Bedeutung der HPMT ergibt sich dabei aus der traditionsreichen, zielgerichteten Entwicklung der HPMT im VEB Transformatoren- und Röntgenwerk „Hermann Matern" Dresden, die bereits zu zahlreichen weltstandsbestimmenden Erzeugnissen der HPMT führte [1] und durch die seit mehr als 75 Jahren betriebene Hochspannungsforschung an der Technischen Universität Dresden [2].
Es ist deshalb außerordentlich zu begrüßen, daß die Redaktion der Fachzeitschrift ELEKTRIE auch 1986 die Möglichkeit gefunden hat — wie bereits 1981 im Heft 7; 1983 im Heft 4 und 1984 im Heft 10 — ein Heft schwerpunktmäßig für Probleme der HPMT zur Verfügung zu stellen.

Weltweit gesehen wird es auch in den nächsten Jahrzehnten zum weiteren Anstieg des Verbrauches an Elektroenergie kommen. Das steht damit im Zusammenhang, daß eine Reihe von Ländern (z.B. die VR China, die Republik Indien, Brasilien) noch einen erheblichen Nachholebedarf in der Erzeugung von Elektroenergie aufweisen und der verstärkten Anwendung von Elektroenergie in einer Volkswirtschaft in mehrfacher Hinsicht eine Schlüsselrolle zukommt.
Die stärkere Orientierung der Gebrauchsenergieträgerstruktur, d.h. die stärkere Durchsetzung der Elektrotechnik, ermöglicht wesentliche Erhöhungen des Produktivitätsniveaus und erhebliche Energieeinsparungen. Selbstverständlich sind dabei alle Maßnahmen im Zusammenhang mit einer rationellen Nutzung u.a. durch den konsequenten Einsatz der Mikroelektronik zu sehen.

Die Lösung der vor uns stehenden Aufgaben setzt neben Spitzenparametern der zur Versorgung der Volkswirtschaft mit Elektroenergie notwendigen Geräte und Apparate vor allem eine hohe Qualität, d.h. eine hohe Zuverlässigkeit und damit hohe Verfügbarkeit dieser Geräte, voraus. Deshalb sind die Aufgaben der Diagnostik sowohl beim Hersteller (Entwicklungs-, Typ- und Stückprüfung) der Geräte und Apparate als auch im Betrieb (Zustand, Restlebensdauer) von entscheidender Bedeutung. Problemen der Diagnostik im Betrieb, der dazu durchgeführten Grundlagenforschung und der Entwicklung von diesbezüglichen Meßgeräten waren bereits zahlreiche Beiträge in der Zeitschrift ELEKTRIE gewidmet, z.B. ELEKTRIE, Berlin 38 (1984) 10. Sie werden in diesem Heft fortgesetzt durch einen Vorschlag zur Standardisierung (Lemke, Haller).

Hauptsächlich soll in diesem Heft der hohe Stand, die Weiterentwicklung und Automatisierung der im VEB Transformatoren- und Röntgenwerk „Hermann Matern" Dresden produzierten Hochspannungs-Prüf- und -Meßtechnik gezeigt werden (Beiträge: Maucksch/Freitag/Dietrich, S. 205—207; Bachmann/Köckritz/Vetters, S. 225—227; Thümmler, S. 227—228.) Bei der Projektierung und dem Entwurf solcher Prüftechnik werden in zunehmendem Maße rechnergestützte Verfahren (CAD) eingesetzt (Beiträge: Lemke, S. 222—224; Wolf, S. 229—231; Hauschild/Wolf, S. 231—236).

Es ist undenkbar, daß die Entwicklung neuer, den zukünftigen Aufgaben entsprechender HPMT ohne eine intensive Grundlagenforschung erfolgen kann. Dazu gibt es in der DDR eine umfangreiche Forschungskooperation zwischen Industrie, Hochschulen und Akademie der Wissenschaften der DDR. Veranschaulicht wird diese Zusammenarbeit durch zum Teil auch gemeinsame Beiträge in diesem Heft (Beiträge: Lemke, S. 222—224; Rausendorf/Schufft, S. 213—216; Pflicke/Lemke, S. 217—219; Schufft/Beyer, S. 220 bis 222; Menzel/Bärsch/Pilling, S. 210 bis 212). Sie sind auf die Entwicklung von Hochspannungs-Prüfanlagen gerichtet, die für die in Aussicht genommene weitere Erhöhung der Übertragungsspannung der Elektroenergiesysteme benötigt werden, wirken aber auch qualitätsfördernd für die gesamte Hochspannungs-Prüf- und -Meßtechnik.

Literatur

[1] Schwab, H.: Ein Werk mit Tradition und Zukunft. ELEKTRIE, Berlin 38 (1984) 10, S. 363
[2] Mosch, W.: 50 Jahre Hochspannungslaboratorium an der Technischen Universität Dresden. ELEKTRIE, Berlin 33 (1979) 12, S. 623–625

EA 2157

Druckgasisolierte Schaltanlagen (GIS) – Technologie und Praxis

Internationales Symposium vom 9. bis 12. September 1985 in Toronto (Kanada)

Das GIS-Symposium wurde von dem Energieversorgungsunternehmen Ontario Hydro, das selbst auf dem Gebiete der SF_6-isolierten Systeme aktiv forscht, in Zusammenarbeit mit der Kanadischen Elektrotechnischen Assoziation und dem Electric Power Research Institute, USA, veranstaltet. Technische und ökonomische Gesichtspunkte druckgasisolierter Schaltanlagen wurden von 270 Fachleuten aus 16 Ländern anhand der 50 Beiträge (s. u.) umfassend diskutiert.

Die Wirtschaftlichkeit von GIS wird maßgeblich durch die Spezifikation, die optimale Gestaltung von Transporteinheiten, den Wartungsaufwand und das Reparaturkonzept bestimmt. Liegen nicht Sonderbedingungen vor, kann für GIS bis 145 kV die Wirtschaftlichkeit nur durch Kompaktlösungen (z. B. durchgehend dreiphasige Kapselung, Schranktype) erzielt werden. Für höhere Isolationsspannungen sind GIS nach Aussage der anwesenden Hersteller und Betreiber in der Regel wirtschaftlicher als klassische luftisolierte Systeme.

Der konstruktive Trend wird gekennzeichnet durch die erwähnten Kompakttypen, die teilweise Einbeziehung der Transformatoren, den durchgehenden Einsatz von Metalloxid-Ableitern (MOA) und die Verwendung besonderer Sorgfalt auf Trennschalter (Entstehung extrem steiler Überspannungen, Isoliervermögen) und Isolierstoffbauteile (Beständigkeit gegenüber SF_6-Zersetzungsprodukten). Bei der Sekundärtechnik gilt größte Aufmerksamkeit der elektromagnetischen Verträglichkeit, da z. B. bei Trennerschaltungen im Sekundärteil mit Überspannungen bis 10 kV zu rechnen ist.

Bezüglich der Prüftechnik scheint weitestgehende Übereinstimmung erreicht:

Vor Ort sind bei 50-Hz-Wechselspannung Teilentladungsmessungen sowie Prüfungen mit Blitzspannungen zur Erkennung von Schwachstellen von besonderer Bedeutung. Die nötigen, vor Ort montierbaren Prüfanlagen zur Erzeugung oszillierender Impulsspannungen mit Ausnutzungsfaktoren größer Eins werden heute, z. B. vom VEB TuR Dresden/DDR, industriell gefertigt und problemlos bereitgestellt. Zu beachten ist, daß bei Durchschlägen während der Prüfung Wanderwellenvorgänge ausgelöst werden können, die in anderen Teilen des GIS zu Beanspruchungen bis zum Doppelten der Prüfspannung führen können. Bei Vor-Ort-Prüfungen werden sehr häufig Fehler festgestellt (etwa in 66 % aller geprüfter Einheiten), die vorwiegend durch Partikel verursacht worden sind.

In zunehmendem Maße entwickelt sich eine GIS-Diagnosetechnik, wobei von einzelnen, im Zusammenhang mit Wartungsmaßnahmen durchgeführten diagnostischen Untersuchungen (Gasanalyse, TE-Prüfung usw.) zu kompletten, permanent arbeitenden Diagnosesystemen übergegangen wird. Solche rechnergeführten Systeme ergänzen die klassische Schutztechnik durch neuartige Sensoren (akustisch, elektrisch, chemisch, mechanisch) und schaffen die Voraussetzung für unbemannt arbeitende Umspannwerke. In Japan sind Prototypen in der Erprobung.

Die Diskussionen zu den Betriebserfahrungen zeigten, daß die Wartungsfreiheit von GIS nicht erreichbar ist, wohl aber wartungsarme Systeme bereits zur Verfügung stehen. Während japanische und europäische Betreiber über befriedigende Ausfallraten berichten (z. B. nach 5 Jahren $\lambda = 0{,}02$ je Feld und Jahr), scheinen auf dem amerikanischen Kontinent beträchtliche Probleme zu bestehen. Von dort kommen daher massive Forderungen nach „reparaturfreundlicher" Konstruktion und kurzen Reparaturzeiten (z. Z. Mittelwert 2 bis 3 Wochen).

Obwohl also noch eine Reihe von Problemen zu lösen sind, besteht Übereinstimmung, daß moderne Systeme der Elektroenergieversorgung nicht auf GIS verzichten können.

Beiträge des GIS-Symposiums

[1] *Furumasu, B.; Ray, J.:* Managing the Transition from AIS to GIS Technology. BPA (USA)

[2] *Szente Varga, H. P.:* The Economics of GIS Applications. BBC, Oerlikon Works (Schweiz)

[3] *Peat, A. J.; Sabath, J.:* Economic Comparison of GIS and AIS for SCE's Serrano Substation. So. Cal. Edison (USA)

[4] *Pryor, B. M.:* Specification of User Requirements for Gas-Insulated Switchgear. South Scotland Electricity Board (GB)

[5] *Icardo, D.; Manin, C.:* A Manufacturer's Perspective on GIS Specifications. Alstom Atlantique (Frankreich)

[6] *Stuckless, H. A.; Hick, M.:* Specification and Manufacturer Design Review for GIS. Ontario Hydro (Kanada)

[7] *Rowe, S. W.:* Investigation of Metal-Clad Disconnector Performance. Merlin Gerin (Frankreich)

[8] *Koenig, D.; Imgrund, G.; Meppeling, J.; Schicht, D.:* Performance of Disconnector under Laboratory and Network Conditions. TH Darmstadt (BRD)

[9] *Harvey, S. M.:* Control Wiring Transients and Electromagnetic Compatibility in GIS. Ontario Hydro Research (Kanada)

[10] *Nitta, T.; Matsuda, S.; Yoshizumi, T.:* Problems in the Design and Appl. of High Current GIS. Mitsubishi (Japan)

[11] *Alvinson, R.; Ekander, H.:* A Method to Predict Temperature Rises of GIS. ASEA (Schweden)

[12] *Saito, K.; Nakano, K.; Maruyama, S.; Ozawa, J.:* Insulation Coordination for GIS by Application of ZnO Arrester. (Hitachi; Japan)

[13] *Schwarz, J.; Müller, O.; Noack, F.:* Design of GIS with Regard to Insulation Co-ordination and Earthing Problems. VEB Transformatorenwerk „Karl Liebknecht" Berlin; IH Zittau; TH Ilmenau (DDR)

[14] *Kugler, R.; Habedank, U.; Veuhoff, F.:* Development of a New Type Test Specification for Ground Switches. Siemens AG (BRD)

[15] *Chu, F. Y.; Boggs, S. A.:* Design Criteria for GIS Spacers — A User's Perspective. Ontario Hydro Research (Kanada)

[16] *Nellson, J. B.:* Energy Measurement of Transient Ground Rise Pulses. BC Hydro — Research and Development (Kanada)

[17] *Peelo, D. F.:* 230 kV GIS at BC Hydro's Cathedral Square Substation. B. C. Hydro (Kanada)

[18] *Quinata, J.:* BPA's 500 kV Taft Substation. Bonneville Power Administration (USA)

[19] *Farmer, F.:* Construction and Commissioning of an Outdoor GIS. Nova Scotia Power Corporation (Kanada)

[20] *Feser, K.; Maier, H. A.:* Considerations Related to the Dielectic Field Testing of GIS. U. of Stuttgart (BRD)

[21] *Hauschild, W.; Mosch, W.:* Field Testing of GIS from the Viewpoint of Failure Mechanismus. VEB TuR Dresden. TU Dresden (DDR)

[22] *Schmidt, W.; Menten, L.; Zaengl, W.:* High Voltage Field Testing of GIS. BBC; ETH Zürich (Schweiz/BRD)

[23] *Diessner, A.:* High Voltage Site Testing of GIS. Siemens (Berlin (West))

[24] *Thione, L.:* Progress in Design & Testing of Metal Clad Gas-Insulated Installations. CESI (Italien)

[25] *Kindersberger, J.; Taschner, W.:* Impulse Voltage Breakdown in SF_6 under AC and DC Prestressing. TU München (BRD)

[26] *Stemmler, G.; Sarkinen, S.; Stearns, R.:* BPA's Test & Evalution Programm on GIS. BPA (USA)

[27] *Okumura, K.; Maeda, M.; Sasaki, K.:* Diagnostic Techniques to detect Abnormal Conditions in GIS Hitachi Ltd. (Japan)

[28] *Nitta, T.; Ibuki, K.; Tada, S.:* Application of On-Line Diagnostic Techniques to GIS. Mitsubishi Electric (Japan)

[29] *Murayama, Y.; Fujmo, H.; Ozaki, Y.; Oishi, M.:* Application of PC for GIS control and self-diagnosis. Toshiba Corp. (Japan)

[30] *Rowe, S. W.:* Flashover, Location GIS Testing. Merlin Gerin (Frankreich)

[31] *Ryan, H. M.; Milne, D.; Powell, C. W.:* Site Testing and Distinguishing Gas and Spacer Surface Flashovers. NEI Reyrolle Ltd. (GB)

[32] *Hampton, B. F.; Pryor, B.; Watson-Jones, B.:* The Application of Partial Discharge Measurements to GIS. Central Electricity Research Laboratories (GB)

[33] *Lalot, J.:* An On-Site Acoustic Detection Technique für GIS. EDF, Direction des Etudes et Recherches (Frankreich)

[34] *Hegerberg, R.; Lundgaard, L. E.; Spaeren, P.; Skyberg, B.:* On-Site Particle Detection in GIS by Acoustic Measurement. EFI (Norwegen)

[35] *Cox, B. M.:* Partial Discharge Detection in GIS by an Optical Technique. Central Electricity Research Laboratories (GB)

[36] *Rein, A.; Sparen, P. H.; Holt, P. A.:* Service Experience with GIS in Norway. Norwegian Inst. Technology (Norwegen)

[37] *Thuries, E.; Delcoustal, B.; Joueux-Bouillon, B.:* The First Commercial 800 kV GIS: 5 Years of Service Experience. Alsthom Atlantique/AEP (Frankreich/USA)

[38] *Vorwerk, H.-J.:* Operational Experience with GIS for 145 and 245 kV, Bernische Kraftwerke AG (Schweiz)

[39] *Heinemann, T.; Hadorn, P.:* Experience with GIS and Reasons for their High Reliability. Sprecher und Schuh Ltd. (Schweiz)

[40] *Patrunky, H.; Olsen, W.:* Service Experience and Maintenance Procedures for GIS. BEWAG (Berlin (West))

[41] *Bolin, P. C.; Hopkins, M. D.:* Constraints on Fault Repair of GIS. Westinghouse Electric (USA)

[42] *Alexander, R.; Bowring, S. D.; Chu, F. Y.:* GIS Downtime & Fault Repair Technique. Pennsylvania Power & Light, Ontario Hydro (Kanada)

[43] *Mitchel, G.; Castongyay, J.; Trinh, G.:* Practical Thermodynamics of SF_6 Recovery from SF_6/N_2 Mixtures. IREQ (Kanada)

[44] *Castonguay, J.; Larocque, R.:* Low-Cost Technique for Field Analysis of SF_6 Decomposition. Byproducts. IREQ (Kanada)

[45] *Dominelli, N.:* Application of SF_6 Decomposition Byproduct Analysis in BC Hydro. BC Hydro (Kanada)

[46] *Lutz, F.; Stegmueller, K.:* Medium High Voltage GIS Concept and Design of a New Generation. Sachsenwerk A.G. (BRD)

[47] *Shibata, T.; Tanabe, T.; Kuroda, Y.; Nagooka, Y.:* Development and Application of All-in-One GIS. Nissin Electric Co.; Ltd. Maebashi Works (Japan)

[48] *Lieske, M.:* Compact Design of SF_6-Insulated Switchgear. Siemens AG (BRD)

[49] *Suzuyama, H.; Kikuchi, T.; Nosokawa, N.:* Study on Optimum Configuration of GIS. Hitachi (Japan)

[50] *Boudiak, J. P.; Messie, M.:* Maintenance of GIS: How to Assure Maximum Service Continuity. Merlin Gerin (Frankreich)

W. Hauschild, Dresden

EA 2183

Gestaltungsgesichtspunkte für TE-Kabelprüfplätze auf der Basis eines breitbandigen TE-Meßsystems[1)]

S. Maucksch, KDT; W. Freitag, KDT; M. Dietrich, KDT; Dresden

Mitteilung aus dem VEB Transformatoren- und Röntgenwerk „Hermann Matern" Dresden

Verwendete Formelzeichen und Indizes

a_s	Schirmdämpfung
a^x	erforderliche Dämpfung des Grundstörpegels
C_K	Kapazität des Koppelkondensators
l_1, l_2, l_3	Antennenlänge
Q_{st}	Grundstörpegel
$Q_{st\,zul}$	zulässiger Grundstörpegel
U	Prüfspannung
U_n	Nennspannung
U_{st}	Störspannung am Ausgang des TE-Meßverstärkers
f_u	untere Grenzfrequenz
t	Zeit

In Hinblick auf die Qualitätssicherung von elektrotechnischen Betriebsmitteln hat in den letzten Jahren die elektrische Teilentladungs (TE)-Meßtechnik stark an Bedeutung gewonnen [1] bis [4]. Insbesondere bei Mittelspannungs- und Hochspannungskabeln mit hochpolymeren Isolierstoffen sind Typ- und Stückprüfungen ohne TE-Messung undenkbar [4] [5]. Auf Grund anspruchsvoller technischer Voraussetzungen steht die TE-Messung im Mittelpunkt aller Betrachtungen zur Kabelprüfung.

Das Hauptproblem beim Aufbau von TE-Prüfkreisen besteht in der Realisierung der erforderlichen Meßempfindlichkeit. Zur Charakterisierung der Meßempfindlichkeit verwendet man eine auf den kompletten Meßkreis bezogene Größe, den Grundstörpegel. Der Grundstörpegel wird als Ladungsgröße ausgedrückt und stellt die Reaktion des Meßkreises auf verschiedene Störsignale dar (HF-Störsignale von Rundfunksendern, Impulsstörsignale von industriellen Steuerungen, nieder- und mittelfrequente Störsignale von rotierenden elektrischen Maschinen, niederfrequente Störsignale von Oberwellen der Netzspannung). Der maximal zulässige Grundstörpegel beträgt entsprechend den vorliegenden Standards für TE-Mittelspannungskabel 2,5 pC [6] bis [9]. Aus der Sicht der TE-Prozesse im PE [4] [5] und für Entwicklungsprüfungen ergibt sich jedoch die verschärfte Forderung nach einem Grundstörpegel unter 1 pC. Die Realisierung derart geringer Grundstörpegel ist durch

- Anwendung eines auf der Basis des breitbandigen TE-Meßverfahrens nach *Lemke* [1] [10] arbeitenden TE-Meßsystems MSTE 3 [11]
- Einsatz teilentladungsfreier Prüfanlagen
- Schirmung des TE-Prüfraumes
- Filter in den Netzzuleitungen
- Filter im Hochspannungskreis und durch
- Störsignalreduzierung mittels elektronischer Schaltungen im TE-Meßgerät möglich.

Ziel beim Aufbau von TE-Prüffeldern muß es sein, die erforderliche Störsignalreduzierung mit minimalem Aufwand zu erreichen. Deshalb ist von jeweils am Ort des Prüffeldes tatsächlich auftretenden (oder zu erwartenden) Störsignalen auszugehen. Daraus läßt sich der Umfang der notwendigen Maßnahmen und deren geeignete Kombination zur Störsignalreduzierung ableiten. Am Beispiel von Kabelprüffeldern (Bild 1) werden die zu dieser Problematik gewonnenen Erkenntnisse vorgestellt.

1. Grundstörpegelmessung

Auf Grund von leitungs- und strahlungsgebundenen Kopplungen zwischen dem TE-Meßkreis und verschiedenen Störquellen kann der Grundstörpegel wesentlich über das Grundrauschen des TE-Meßgerätes ansteigen. Im allgemeinen ist die Störbeeinflussung des TE-Meßkreises jedoch nicht theoretisch vorausbestimmbar. Daher muß der Grundstörpegel am Ort des Prüffeldes mit Hilfe eines Modell-TE-Meßkreises (Bild 2) aus folgenden Komponenten ermittelt werden: PE-Kabel (Fertigungslänge), Koppelkondensator $C_K = 10$ nF (induktivitätsarmer Niederspannungskondensator), Antenne zur Nachbildung der Antennenwirkung des Hochspannungskreises, Meßimpedanz, TE-Meßgerät MTE 3.

Der von Lang- und Mittelwellensendern verursachte HF-Grundstörpegel liegt ohne irgendeine Schirmung meist zwischen 15 und 50 pC (siehe auch [12]), wenn sich das Prüffeld im Fernfeld des Senders befindet. Bei Anschluß des Modell-TE-Meßkreises an das Niederspannungsnetz kann der Einfluß von Netzstörspannungen auf den TE-Meßkreis ermittelt werden. Auf Grund komplizierter Netzbedingungen durch Netzrückwirkungen leistungselektronischer Steuerungen (je nach Errichtungsvorschrift der Steuerung sind periodische Spannungseinbrüche bis zu 0,5 U_n und 1,5 ms Dauer zulässig [13]) kann der Grundstörpegel weit oberhalb von 1 nC liegen, falls der TE-Meßkreis in der Nähe der Störquelle angeschlossen wird. Existieren keine extremen Netzverhältnisse, liegt der Störpegel im Bereich von 200···1000 pC. Es ist grundsätzlich mit einer großen Störimpulshäufigkeit zu rechnen. Somit sind die leitungsgebundenen Störsignale in Kabelwerken der weitaus kritischere Fall im Vergleich zu strahlungsgebundenen Störsignalen. In den folgenden Abschnitten werden die Überlegungen zur Auswahl der Mittel zur Grundstörpegelreduzierung näher dargelegt.

2. Grundstörpegelreduzierung

2.1. Schirmung

Das Verhalten von Schirmungen im elektromagnetischen Feld wird mit Hilfe der Schirmdämpfung a_s beschrieben [14]. In Analogie dazu kann die notwendige Dämpfung des Grundstörpegels in Dezibel entsprechend

$$a^x = 20 \log \frac{Q_{st}}{Q_{st\,zul}} \tag{1}$$

berechnet werden, wobei Q_{st} der Störpegel ohne Schirmung und $Q_{st\,zul}$ der zulässige Störpegel mit Schirmung sind. Es ist anzunehmen, daß die erforderliche Dämpfung a_s der Schirmung proportional zur notwendigen Dämpfung a^x des Störpegels ist, weil die Schirmdämpfung von Kabinen im besonders interessierenden Frequenzbereich 150 kHz bis 5 MHz annähernd frequenzunabhängig ist und keine Resonanzstellen aufweist [15] bis [17]. Für die genannten Bedingungen $Q_{st} = 50$ pC und $Q_{st\,zul} = 0{,}2$ pC beträgt a^x etwa 50 dB. Eine auch in ungünstigen Fällen den Anforderungen der TE-Messung entsprechende Schirmung sollte daher eine Schirmdämpfung in dieser Größenordnung von 50···60 dB haben. Diese Schirmdämpfungen erfordern keine doppelwandigen Kabinen [15] [17]. Berücksichtigt man, daß Stahlkonstruktionen des Prüfgebäudes je nach Ausführung einen Beitrag zur Dämpfung bis zu 40 dB leisten, kann ein relativ einfacher Käfig bei Verzicht auf vollständiges Verschweißen oder Löten angewendet werden. Ein Ausführungsbeispiel dafür sind die aus folgenden Komponenten bestehenden TE-Meßkabinen im Kabelwerk Budapest [18]:

Verzinktes Trapezprofilblech (0,8 mm stark) für Wände und Decke, Streckmetall für den Fußbodenbereich, Wabenkamineinsätze für Lüftungszwecke, geschirmte Türen für die Steuerräume und geschirmte Hubtore (3,6 m × 3,6 m) für die Prüfräume (Bild 3). Die erforderliche großflächige HF-Kontaktierung der Bleche untereinander wird durch Überlappung und Verbindung mit Spezialnieten gewährleistet.

Die Erprobung der Schirmung zeigte, daß die von Rundfunksendern herrührenden Störsignale im TE-Meßkreis nicht mehr nachweisbar waren, was einem Grundstörpegel unter 0,2 pC entspricht. Für die Frequenzen der leistungsstarken örtlichen Rundfunksender durchgeführte Schirmdämpfungsmessungen ergaben insgesamt, d.h. für Gebäude und Kabinen, wirksame Schirmdämpfungen von 85 dB bis 100 dB (Tafel 1). Die Schirmdämpfung der Kabinen selbst liegt

Dr.-Ing. *Stefan Maucksch* ist Entwicklungsingenieur, Dr.-Ing. *Wolfgang Freitag* ist Objektingenieur, Dr.-Ing. *Martin Dietrich* ist Direktor des Betriebsteiles Anlagen im VEB Transformatoren- und Röntgenwerk „Hermann Matern" Dresden.

[1)] Die Autoren danken dem Wissenschaftsbereich Hochspannungstechnik der Technischen Universität Dresden, den Kabelwerken Meißen und Schwerin im Kombinat VEB Kabelwerk Oberspree (KWO) „Wilhelm Pieck" Berlin, dem VEB Starkstrom-Anlagenbau Leipzig—Halle im Kombinat Automatisierungsanlagenbau und dem Kabelwerk Budapest (Ungarische VR) für die aktive Unterstützung der Arbeiten im Rahmen der Inbetriebnahmen von TuR-Ausrüstungen für die Kabelprüfung.

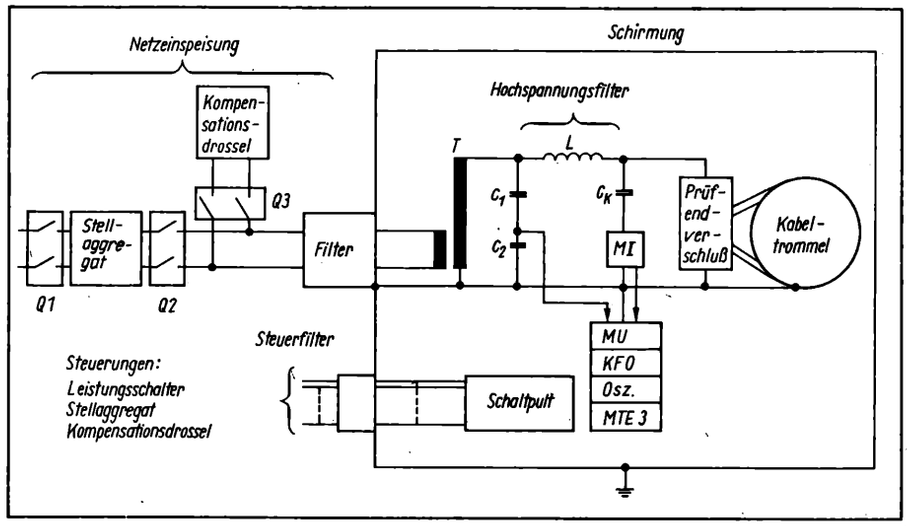


Bild 1. Komponenten des TE-Kabelprüfplatzes

Q 1, Q 2, Q 3 Leistungsschalter; *T* Prüftransformator; C_1, C_2 kapazitiver Spannungsteiler; *L* Induktivität; C_K Koppelkondensator; *MI* Meßimpedanz H 253-1; *MU* Scheitelspannungsmeßgerät; *MTE 3* TE-Meßgerät; *KFO* TE-Fehlerortungsgerät; *Osz.* Oszilloskop

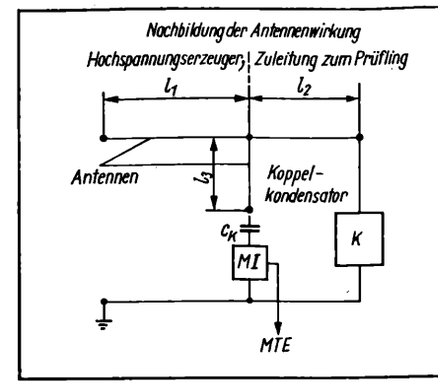


Bild 2. Modell-TE-Meßkreis für Untersuchungen zum Grundstörpegel

C_K Koppelkondensator; *MI* Meßimpedanz; *MTE* TE-Meßgerät; *K* PE-Kabel (Fertigungslänge); l_1, l_2, l_3 Antennenlänge (ist entsprechend der räumlichen Abmessungen des TE-Meßkreises zu wählen, z. B. l_3 Höhe des Koppelkondensators)

Tafel 1
Schirmdämpfung von Prüfgebäude und TE-Meßkabine am Ort des TE-Meßkreises (Bezugswert außerhalb des Prüfgebäudes, Kabelprüffeld Budapest [18])

Frequenz kHz	Schirmdämpfung a_s/dB Kabine 1 $B \times T \times H$ 6 m × 14 m × 4,8 m	Kabine 2 $B \times T \times H$ 11 m × 17 m × 6 m
540	85	95
873	90	96
1340	95	98

zwischen 50 und 60 dB. Die genannten Dämpfungswerte unterstreichen den Einfluß des Prüfgebäudes auf die Reduzierung von strahlungsgebundenen Störsignalen. Als Grenzwert für die Dämpfung von Schirmungen aus genieteten Stahlblechen kann man 50 bis 60 dB angeben (siehe auch [19]).

Auf der Grundlage der gewonnenen Erfahrungswerte könnte in einer Reihe von Fällen auch ein Maschendrahtkäfig mit 30···40 dB Dämpfung [16] die Anforderungen erfüllen. Aus technologischen Gründen wird man jedoch einer einfachen Blechkabine den Vorzug gegenüber dem Maschendrahtkäfig geben. Bei Anordnung der TE-Meßkabine innerhalb von Prüfgebäuden ist im allgemeinen eine Einbeziehung des Meß- und Steuerraumes in die Schirmung nicht notwendig, weil die Beeinflussung des TE-Meßkreises hauptsächlich im Hochspannungskreis erfolgt. Das TE-Meßsystem kann außerhalb der Schirmung aufgestellt werden, wobei die Meßleitungen aus dem Hochspannungskreis geschirmt bis zum Meßsystem geführt werden.

2.2. Reduzierung leitungsgebundener Störsignale

2.2.1. Netzgestaltung

Ausgehend von extremen Störverhältnissen, z. B. Spannungseinbrüche bis 0,5 U_n [13], wären sehr aufwendige Filter mit einer Dämpfung von weit über 100 dB erforderlich. Der Filteraufwand kann jedoch durch zweckmäßige Gestaltung der Netzeinspeisung optimiert werden. Eine Möglichkeit dazu bietet die Einspeisung von Prüfanlagen aus dem Niederspannungsnetz über eine Motor-Generator-Anlage. Auf der Generatorseite sind dann nur noch die Eigenstörungen des Generators wirksam. Bei Prüfanlagen mit Mittelspannungseinspeisung sind die Verhältnisse auf Grund schwächer ausgeprägter Kopplungen zu den Störquellen im Niederspannungsnetz nicht so kritisch. Durch geeignete Verlegung der Starkstromkabel müssen Kopplungen zu besonders störsignalbehafteten Kabeln, z. B. Energieanschlüsse von Verseilmaschinen, vermieden werden.

Ein weiterer Gesichtspunkt für die Netzgestaltung sind die durch Rundfunksender induzierten HF-Störspannungen auf Leitungen. In einem geschirmten TE-Meßkreis wurden ohne Filter HF-Störpegel von 10···50 pC registriert. Dieser Wert kann bei Einspeisung mittels Freileitung weit überschritten werden [12]. Daher sollte die Einspeisung der Prüffeldverteilung mittels Freileitung vermieden werden. Die Mittelspannungseinspeisung über Kabel ist aus Sicht der HF-Störspannung (Kabel ist geschirmt) die günstigste Lösung.

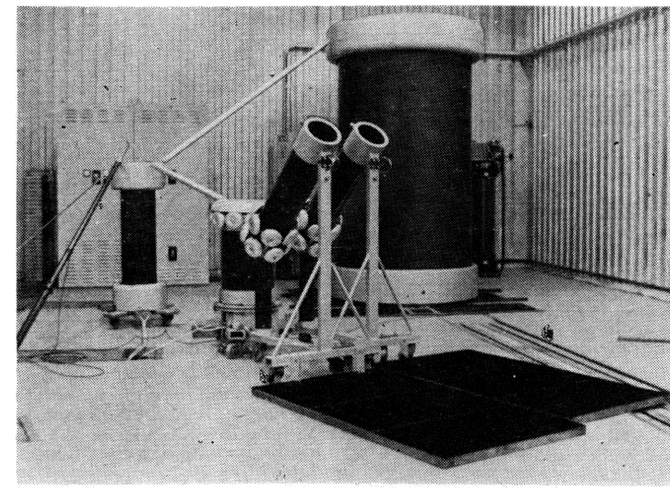
2.2.2. Netzfilter

Auch bei Optimierung der Netzeinspeisung müssen die noch vorhandenen leitungsgebundenen Störsignale mittels Filter reduziert werden. Der erforderliche Dämpfungswert beträgt für periodische HF-Störsignale mindestens 50 dB. Weil Impulsstörsignale bei optimierter Netzeinspeisung in der Regel zwischen 100 und 1000 pC liegen, ergibt sich hierfür eine noch höhere notwendige Dämpfung von mindestens 75 dB. Es erscheint daher gerechtfertigt, daß in der Leistungseinspeisung des Prüftransformators anzuordnende Filter für eine Dämpfung von 90···100 dB auszulegen sind. An die Filter für Steuerleitungen der Prüfanlage werden geringere Anforderungen gestellt, weil zwischen den Steuerleitungen und dem TE-Meßkreis eine weniger ausgeprägte Kopplung vorliegt. Eine Dämpfung der Steuerfilter im Bereich von 50 dB ist meist ausreichend.

Auf Grund der breitbandigen TE-Signalverstärkung müssen auch die Filter eine Bandbreite von etwa 5 MHz haben. Die untere Grenzfrequenz beträgt bei vertretbarem Aufwand etwa 30 kHz. Im Frequenzbereich unter 30 kHz auftretende niederfrequente Störsignale, z. B. Oberwellen der Netzspannung, werden folglich nicht gedämpft. Der Grundstörpegel muß bei Vorhandensein niederfrequenter Störsignale durch Erhöhung der unteren Grenzfrequenz des TE-Meßstärkers[2]) reduziert werden. Durch eine geringfügige Schaltungsmodifikation der Meßimpedanz H 253-1 läßt sich die untere Grenzfrequenz im Bereich von 7 kHz bis 150 kHz variieren. Beispielsweise konnte mit dieser Maßnahme der durch Oberwellen der Netzspan-

[2]) Es wird vorausgesetzt, daß Meßimpedanz, Meßkabel und Verstärker als eine Einheit betrachtet werden.

Bild 3. Hochspannungskreis für die TE-Messung an PE-Mittelspannungskabeln in einer geschirmten Kabine (Ausführungsbeispiel Kabelwerk Budapest [18], 60-kV-Prüfanlage)



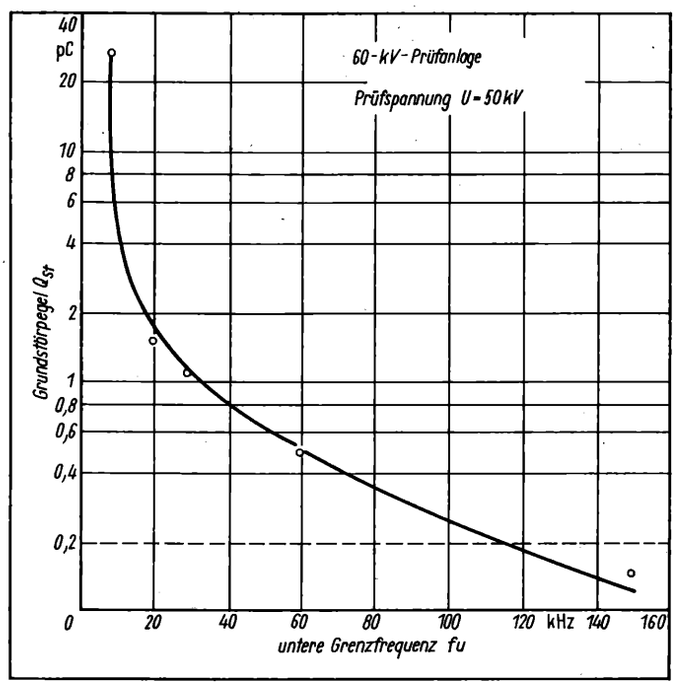


Bild 4. Reduzierung des Grundstörpegels bei oberwellenbehafteter Netzspannung durch Erhöhung der unteren Grenzfrequenz des TE-Meßverstärkers (im vorliegenden Fall betrug die Grundfrequenz der Oberwellen 2,5 kHz)

nung verursachte Störpegel bis unterhalb von 0,2 pC verringert werden (Bild 4). Dabei handelte es sich um einen Oberwellengehalt, der entsprechend den Vorschriften durchaus zulässig ist ($< 1\,\%$).

Im unteren Frequenzbereich ist eine weitere Erscheinung zu berücksichtigen, die mit dem Impulsübertragungsverhalten von Filtern zusammenhängt. Der Filter reagiert auf einen Störimpuls am Eingang mit einem schwingenden Impuls (Frequenz 5···10 kHz) am Ausgang (Bilder 5a, b), weil ein schwingungsfähiges System bei Impulserregung mit der Eigenresonanzfrequenz ausschwingt. Der Grundstörpegel muß auch hier durch Erhöhung der unteren Grenzfrequenz des TE-Meßverstärkers verringert werden. Bei ungünstigen Netzbedingungen (Netz nicht entsprechend Punkt 2.1. optimiert) ist es möglich, daß der Grundstörpegel trotzdem einige Picocoulomb überschreitet. Abhilfe kann nur durch Verringerung der Eigenresonanzfrequenz des Kreises geschaffen werden. Die notwendige Vergrößerung der Induktivität kann mit vertretbarem Aufwand nur im Hochspannungskreis erfolgen (siehe Abschnitt 2.2.3.).

Die Anzahl der Filter läßt sich erheblich einschränken, wenn nur der Hochspannungskreis geschirmt wird. In diesem Fall wird nur der Prüftransformator, die Beleuchtung und das TE-Meßsystem über Filter gespeist.

2.2.3. Filter im Hochspannungskreis

Die Anordnung der TE-Meßkreise in geschirmten Prüfräumen erübrigt Hochspannungsfilter zur Reduzierung von HF-Störspannungen. In bestehenden älteren Anlagen, die mit TE-Meßtechnik nachgerüstet werden, können einstufige Hochspannungsfilter den Störpegel, der durch TE im Prüftransformator verursacht wird, in begrenztem Maß (10···15 dB) reduzieren.

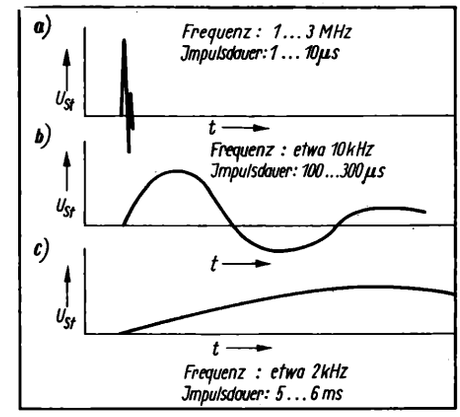
Die im Fall komplizierter Bedingungen im Niederspannungsnetz der Prüfanlageneinspeisung notwendige Verringerung der Eigenresonanzfrequenz des Kreises kann mit einem speziell dafür ausgelegten Hochspannungsfilter erfolgen (Bild 5c). Beispielsweise gelang es dadurch, den Grundstörpegel von 4 pC auf weniger als 0,2 pC zu verringern. Das Beispiel weist auf die Möglichkeit hin, bis zu einem Grenzwert der Netzstörspannungen auf einen extrem hohen Aufwand für das Netzfilter ($a > 100$ dB) bzw. auf den Einsatz einer Motor-Generator-Anlage zu verzichten.

3. Hochspannungskreis

Die Hochspannungskreise von TE-Prüffeldern werden auf der Basis TE-freier Prüftransformatoren aufgebaut. Wie bereits in [1] dargelegt, kann der geforderte Grundstörpegel mit relativ kleinen Koppelkapazitäten ($C_k = 8$ nF für Mittelspannungskabel, $C_k = 2$ nF für Hochspannungskabel) erreicht werden.

Außerdem müssen folgende Grundsätze berücksichtigt werden [20]:

Bild 5. Charakteristische Verläufe von leitungsgebundenen Störimpulsen *a*) Störsignalverlauf ohne Netzfilter; *b*) Störsignalverlauf mit Netzfilter; *c*) Störsignalverlauf bei Erhöhung der Induktivität im Hochspannungskreis (mit Netz- und Hochspannungsfilter)



— Die Erdleitungen sind so kurz wie möglich und aus 600 mm breiter Kupferfolie auszuführen.
— Die Erdleitung ist nur an einem Punkt an der Schirmung anzuschließen.
— Die Erdung der Schirmung sollte über einen zentralen Anschlußpunkt mit dem Erdungssystem des Prüffeldes verbunden werden.
— In der Nähe des Hochspannungskreises befindliche metallische Gegenstände (z. B. Kabelkanalabdeckungen, Lampenschirme, Schaltschränke) sind zur Vermeidung kapazitiver Entladungen zu erden.
— Der TE-freie Kabelendenabschluß ist zu gewährleisten.

4. Zusammenfassung

Ausgehend vom zulässigen Grundstörpegel für TE-Messungen an PE-Kabeln und von am Ort des Prüffeldes zu erwartenden Störverhältnissen wurde die Problematik der Grundstörpegelreduzierung diskutiert. Es wurde gezeigt, daß der Aufwand für Schirmung und Filter optimiert werden kann. Weitere systematische Untersuchungen müssen zur Präzisierung der Gestaltungskriterien beitragen.

Literatur

[1] *Lemke, E.:* Ein neues Verfahren zur Messung von Teilentladungen an langen Hochspannungskabeln. ELEKTRIE, Berlin 35 (1981) 7, S. 358—360
[2] *Lemke, E.:* A new method for PD measurement on polyethylene insulated power cables. Third Intern. Symposium on High Voltage Engineering (1979) Milan, paper 43.13
[3] *Lemke, E.:* Zur Problematik der Ortung von Teilentladungs-Fehlstellen in plastisolierten Hochspannungskabeln. ELEKTRIE, Berlin 35 (1981) 7, S. 360 bis 363
[4] *Beinert, J.; Schuppe, W.:* Die Bedeutung der Teilentladungsmessung für die Erkennung von Störstellen bei kunststoff-isolierten Mittelspannungskabeln. Elektrizitätswirtschaft 76 (1977) 26, S. 925
[5] *Küllig, P.; Schierig, S.; Weißenberg, W.:* Erfahrungen mit Polyäthylen als Isolierstoff für Mittelspannungskabel. ELEKTRIE, Berlin 35 (1981) 7, S. 363—367
[6] IEC-Publication 270 Partial disscharge measurement. Ausg. 1981
[7] IEC-Document 20 A (Secr.) 107 Test methode for partial discharge measurements on lengths of electric cable. Ausg. 1984
[8] DIN 57472 Teil 513/VDE 0472 Teil 513 Prüfung an Kabeln und isolierten Leitungen Teilentladung. Ausg. Juli 1982
[9] DIN 57273/VDE Kabel mit Isolierung aus thermoplastischem oder vernetztem Polyäthylen-Nennspannungen: Uo/U 6/10, 12/20 und 18/30 kV. Ausg. Oktober 1981
[10] *Lemke, E.:* Prinzipien und Geräte der breitbandigen Teilentladungsmessung. Konferenzband VDE-ETG-Fachtagung Teilentladungen (TE) in Betriebsmitteln der Energietechnik, Esslingen 1985
[11] *Hauschild, W.; Küttner, H.; Thümmler, K.:* Systeme zur breitbandigen Messung von Teilentladungen in Hochspannungsisolierungen. ELEKTRIE, Berlin 35 (1981) 7, S. 353—357
[12] *Lemke, E.; Schierig, S.; Weißenberg, W.:* Messung von Teilentladungen an PE-isolierten Mittelspannungskabeln unter Vor-Ort-Bedingungen. ELEKTRIE, Berlin 38 (1984) 10, S. 389—391
[13] TGL 200-0608/03 Stromrichteranlagen und -geräte. Allgemeine technische Forderungen. Ausg. April 1977
[14] *Höring, H. C.:* Elektromagnetische Schirmung. Handbuch für Hochfrequenz- und Elektrotechniker. Heidelberg: Hüthig Verlag 1981, Bd. 2, S. 457—500
[15] *Lukaschewitsch, A.; Peschke, E.:* Geschirmte Hochspannungshalle für Teilentladungsmessungen an Kunststoffkabeln. Siemens-Zeitschrift 50 (1976) 7, S. 481 bis 485
[16] *Peier, D.:* Fragen der Schirmung bei Teilentladungsmessungen. Konferenzband VDE-ETG-Fachtagung Teilentladungen (TE) in Betriebsmitteln der Energietechnik, Esslingen 1985
[17] EMV Raumabschirmung, Kabinen, Bauteile, Filter. Siemens-Datenbuch 1983/84
[18] *Dietrich, M.; Freitag, W.:* Ein neues Hochspannungsprüffeld für das Kabelwerk Budapest. ELEKTRIE, Berlin 38 (1984) 11, S. 435
[19] *Heller, H.-J.:* Voll geschirmter Teilentladungsversuchsstand für 250 kV Wechselspannung unter Verwendung von ferromagnetischen rostfreien vermieteten Blechen. Bericht 1982/83/84 TH Darmstadt, Institut für Hochspannungs- und Meßtechnik
[20] Hinweise zum Aufbau von Hochspannungskreisen für TE-Messungen. Sonderdruck VEB Transformatoren- und Röntgenwerk „Hermann Matern" Dresden

EA 5679

Normalfunkenstrecke zur Überprüfung von Teilentladungs-Meßkreisen bei Hochspannung

E. Lemke, KDT; R. Haller, KDT; Dresden

Vergleichsmessungen zur Kalibrierung von Teilentladungs-Meßkreisen, die im Rahmen von INTERELEKTROTEST[1]) in verschiedenen Laboratorien mit gleichen Modellfunkenstrecken aber unterschiedlicher Gerätetechnik durchgeführt werden, ergaben trotz einheitlicher Kalibrierung nach der gültigen IEC-Norm [1] erhebliche Abweichungen ($\geqq 50\,\%$) der gemessenen Ladungswerte. Systematische Untersuchungen zeigten, daß die Ursachen für diese Abweichungen vor allem in der unterschiedlichen Art der Auskopplung und Übertragung der TE-Signale bzw. der Signalverarbeitung und -bewertung der TE-Meßgeräte begründet sind. Die Abweichungen können erheblich reduziert werden, wenn neben der nach IEC-Publikation 270 (1981) standardisierten Kalibriermethode bei Niederspannung auch Überprüfungen des Meßkreises mit einer geeigneten Funkenstrecke bei Hochspannung vorgenommen werden.

Die in der Vergangenheit als „Teilentladungs-Normale" verwendeten Modellfunkenstrecken [2] erwiesen sich als unbrauchbar, da einerseits die Erzielung geforderter Nennwerte für die scheinbare Ladung (z. B. 50 pC) nicht garantiert und andererseits eine Reproduzierbarkeit dieser Nennwerte über längere Zeit nicht erreicht werden konnte. Demzufolge wurde auch in der neuen Fassung der IEC-Publikation 270 (1981) [1] auf die Empfehlung einer Funkenstrecke als Teilentladungs-Normal verzichtet.

Im Rahmen von INTERELEKTROTEST durchgeführte Vergleichsmessungen ergaben, daß die Überprüfung und auch Kalibrierung von Teilentladungs-Meßkreisen mit einer Vergleichsfunkenstrecke unter bestimmten Bedingungen dennoch möglich und zweckmäßig ist. Voraussetzung dafür ist, daß im Gegensatz zu der ursprünglichen IEC-Empfehlung von 1968 auf die Realisierung bestimmter Nennwerte verzichtet wird und dafür die der jeweiligen Modellfunkenstrecke eigenen Werte der scheinbaren Ladung (z. B. 35 pC) als gegeben hingenommen werden. Diese Werte dienen dann als Basis für den Vergleich unterschiedlicher TE-Meßkreise. Dazu ist es notwendig, den aktuellen Basiswert der jeweiligen Vergleichsfunkenstrecke in einem sorgfältig aufgebauten und kalibrierten TE-Meßkreis zu ermitteln.

Nachfolgend wird auf die prinzipielle Konstruktion der IET-Vergleichsfunkenstrecke sowie auf die zweckmäßige Vorgehensweise bei der Überprüfung von TE-Meßkreisen eingegangen.

1. Vergleichsfunkenstrecke

1.1. Konstruktiver Aufbau

Die Elektrode, an der die Teilentladungen zünden, besteht aus einer nadelförmigen Sonde mit dem Krümmungsradius r_1 und der Länge l_1. Sie ragt heraus aus einer Stabelektrode der Länge l_2, die halbkugelförmig mit dem Radius r_2 abgerundet ist. Zum mechanischen Schutz der nadelförmigen Sonde dient eine zylindrische Hülle aus Piacryl, die auf die Stabelektrode geschoben wird (Bild 1). Die Stabelektrode mit der nadelförmigen Sonde wird übereine zylinderförmige Halterung der Länge $l_2{}^+$ mit der Hochspannungsklemme des Prüflings verbunden. Diese Funkenstrecke kann mit dem Hochspannungspol des Prüflings im TE-Meßkreis verbunden werden, so daß sie ohne definiertes Gegenpotential frei in den Raum „sprüht". Dabei ist zu beachten, daß der Abstand a spannungsführender bzw. geerdeter Objekte zur Nadelsonde stets größer ist als $l_2{}^+$ (Bild 2).

Zur Vermeidung äußerer Feldeinflüsse ist es auch möglich, die Stabelektrode mit der nadelförmigen Sonde durch einen metallischen Zylinder mit dem Innenradius r_3 und der Länge l_3 einzuschirmen (Bild 3). Folgende Vorzugswerte werden empfohlen:

$r_1 = 0{,}02 \cdots 0{,}5$ mm	$l_1 = 1 \cdots 5$ mm
$r_2 = 5$ mm	$l_2 = 40$ mm
$2r_3 = 135$ mm	$d = 50$ mm
$l_2{}^* = 140$ mm	$l_3 = 140$ mm.

1.2. Prinzipielles Teilentladungsverhalten

Durch zahlreiche Untersuchungen am Hochspannungslaboratorium der TU Dresden sowie durch abgestimmte Vergleichsmessungen im Rahmen von IET wurde folgendes prinzipielles Teilentladungsverhalten der Vergleichsfunkenstrecke ermittelt:

— Bei Vergrößerung der Nadellänge von $l_1 = 1$ mm auf 5 mm verringert sich die Einsetzspannung U_i der Funkenstrecke eindeutig, gewöhnlich im Verhältnis 2 : 1. Dabei ändert sich die scheinbare Ladung Q_I nicht mehr als um 10 %, so daß eine exakte Einstellung der Länge der nadelförmigen Sonde nicht erforderlich ist.

— Bei Erhöhung der Prüfspannung von 1,0 U_i auf 1,1 U_i ändert sich die scheinbare Ladung Q_I nur unwesentlich, so daß eine exakte Einstellung der Prüfspannung nicht gefordert wird.

— Wird die Prüfspannung nicht über 1,1 U_i erhöht, so bleibt die scheinbare Ladung Q_I auch über einen Beanspruchungszeitraum von einigen zehn Stunden praktisch konstant. Dadurch ist eine gute Reproduzierbarkeit bei Vergleich verschiedener Prüfkreise zur Messung von Teilentladungen gewährleistet.

2. Vorgehensweise bei der Überprüfung von TE-Meßkreisen

In Auswertung der Ergebnisse der oben genannten Vergleichsmessungen wird die nachfolgend angegebene Vorgehensweise zur Überprüfung von TE-Meßkreisen empfohlen.

2.1. Vorbereitung der Messung

Die nadelförmige Sonde der Vergleichsfunkenstrecke ist auf einen gewünschten Krümmungsradius r_1 anzuschleifen. Danach erfolgt eine sorgfältige Reinigung und zum Korrosionsschutz eine feine Benetzung mit Öl. Die Sonde ist dann in die Stabelektrode einzusetzen, und es ist die gewünschte Länge l_1 einzustellen. Abschließend erfolgt eine mikroskopische Kontrolle der Sondenoberfläche dahingehend, daß keine Schmutzpartikeln vorhanden sind und daß keine mechanische Beschädigung vorliegt. Danach wird die Schutzhülle aus Piacryl aufgesetzt. Die Vergleichsmessung kann sowohl bei frei in den Raum ragender Sonde (Bild 2) als auch bei Einbringen der Elektrode in den metallischen Zylinder (Bild 3) durchgeführt werden.

2.2. Durchführung der Messung

2.2.1. Ermittlung der TE-Parameter

Zunächst wird die Vergleichsfunkenstrecke in einem sorgfältig aufgebauten TE-Meßkreis[2]) (Bild 4) angeordnet und gemäß IEC-Publikation 270 kalibriert [1]. Danach ist die Prüfspannung langsam ($\lesssim 0{,}5$ kV/s) bis zur Einsetzspannung bei oszillografischer Beobachtung der auftretenden TE-Impulse zu steigern. Die Prüfspannung sollte so eingestellt werden, daß etwa 4 bis 6 Impulse in der negativen Halbperiode auftreten. Der einwandfreie Zustand der nadelförmigen Sonde ist daran erkennbar, daß sämtliche TE-Impulse etwa die gleiche Amplitude haben (Bild 5a). Bei Störungen an der Oberfläche der nadelförmigen Sonde (z. B. Schmutzpartikeln oder Korrosionserscheinungen) treten unregelmäßige Impulsamplituden auf (Bild 5b), und die Maßnahmen gemäß 2.1. sind zu wiederholen. Bei Vorliegen eines Übersichtsbildes gemäß Bild 5a wird die scheinbare Ladung Q_K der Vergleichsfunkenstrecke ermittelt.

2.2.2. Vergleichsmessung

Nach Anordnung der Vergleichsfunkenstrecke in dem zu überprüfenden TE-Meßkreis, vorzugsweise parallel zum Prüfling, ist wiederum zunächst gemäß IEC-Publikation 270 zu kalibrieren. Im weiteren sind die unter Punkt 2.2.1. beschriebenen Messungen durchzuführen, wobei die scheinbare Ladung Q_M ermittelt wird. Kriterium für eine fehlerfreie Kalibrierung als Grundlage für reproduzierbare TE-Messungen bildet das Verhältnis Q_M/Q_K, wobei die Bedingung

$$\frac{Q_M}{Q_K} = 1 \pm 0{,}1$$

Dr. sc. techn. *Eberhard Lemke* ist Dozent an der Sektion Elektrotechnik/Wissenschaftsbereich Hochspannungstechnik der Technischen Universität Dresden, Dr. sc. techn. *Rainer Haller* war zur Zeit der Abfassung des Manuskripts wissenschaftlicher Oberassistent an derselben Einrichtung.

Die Arbeit wurde im Rahmen der Forschungskooperationsgemeinschaft ELTRA durchgeführt und vom VEB Transformatoren- und Röntgenwerk „Hermann Matern" Dresden unterstützt.

[1]) In der RGW-Prüffeldorganisation INTERELEKTROTEST sind die Hochspannungs- und Hochleistungs-Prüffelder der VR Bulgarien, Ungarischen VR, DDR, VR Polen, UdSSR, SR Rumänien, ČSSR und SFR Jugoslawien vereinigt.

[2]) Die Kopplekapazität muß mindestens 1 nF betragen.

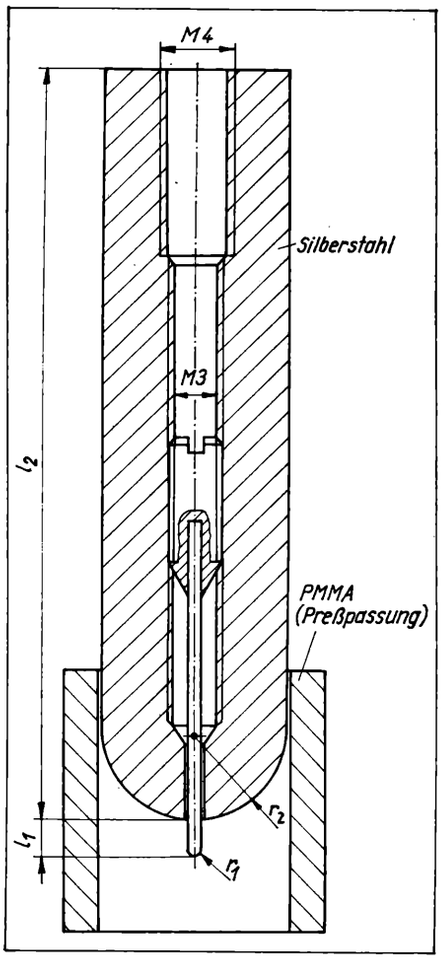


Bild 3. Vergleichsfunkenstrecke mit Prüfgefäß
$d = 50$ mm; $l_3 = 140$ mm; $r_3 = 70$ mm

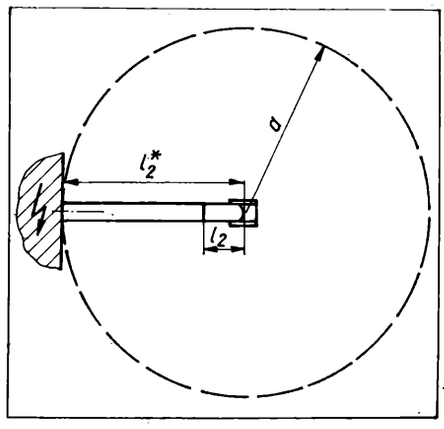


Bild 2. Anordnung der Vergleichsfunkenstrecke im TE-Prüfkreis $l_2 = 40$ mm; $l_2^* = 140$ mm; $a \geqq l_2^*$

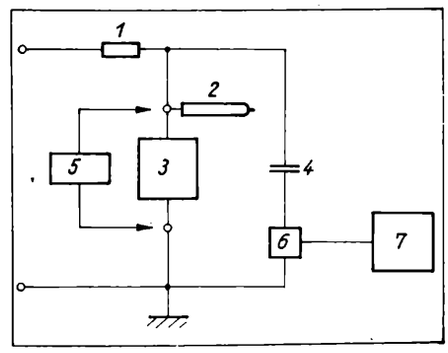


Bild 4. Überprüfung eines TE-Prüfkreises mit der Vergleichsfunkenstrecke
1 Vorschaltimpedanz; *2* Vergleichsfunkenstrecke; *3* Prüfling; *4* Koppelkondensator; *5* Kalibrator; *6* Meßimpedanz; *7* TE-Meßgerät

Bild 1. Vergleichsfunkenstrecke
$r_1 = 0{,}02 \cdots 0{,}5$ mm; $r_2 = 5$ mm; $l_1 = 1 \cdots 5$ mm; $l_2 = 40$ mm

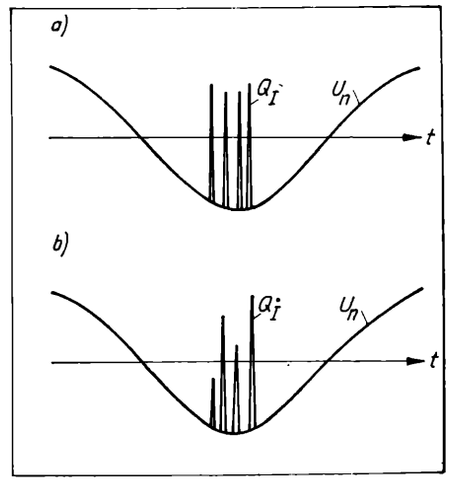


Bild 5. Charakteristische Oszillogramme von TE der Vergleichsfunkenstrecke

erfüllt sein sollte. Treten größere Abweichungen auf, ist die Messung gemäß Punkt 2.2.1. zu wiederholen. Wird der ursprüngliche Wert von Q_K bestätigt, sind die Ursachen für die Abweichung von Q_M zu ermitteln. Ist auch Q_K bei aufeinanderfolgenden Messungen nicht reproduzierbar, so sind die Maßnahmen gemäß Abschnitt 2.1. zu wiederholen.

In weiteren Vergleichsmessungen in Hochspannungsprüffeldern der DDR sowie im Rahmen von IET wurde die Zweckmäßigkeit der genannten Vorgehensweise bestätigt. Neben der zusätzlichen Möglichkeit zur Kontrolle der Ladungsempfindlichkeit von TE-Meßkreisen bei Hochspannung bietet sich der Vorteil, weitere interessierende Parameter zu ermitteln, da das Entladungsverhalten der Vergleichsfunkenstrecke (Phasenlage, Polarität und Form der sogenannten Trichelimpulse) sehr genau bekannt ist. Diese Kennwerte sind besonders interessant im Hinblick auf eine Lokalisierung von Teilentladungen, z. B. durch Nutzung der Impulsrichtungsmethode sowie durch Laufzeitmessungen.

3. Zusammenfassung

Vergleichsmessungen zur Kalibrierung von Teilentladungs-Meßkreisen im Rahmen von INTERELEKTROTEST ergaben, daß es zweckmäßig ist, neben der nach IEC-Publikation 270 (1981) standardisierten Kalibriermethode bei Niederspannung eine zusätzliche Überprüfung des Meßkreises mit einer Vergleichsfunkenstrecke bei Hochspannung durchzuführen. Dadurch ergeben sich folgende Möglichkeiten:

1. Überprüfung der Funktionsfähigkeit des TE-Meßkreises und Kontrolle der Reproduzierbarkeit von TE-Messungen.
2. Vergleich von TE-Meßkreisen bei unterschiedlichen Parametern und Meßgeräten.
3. Ermittlung wichtiger Kennwerte von Teilentladungen (Polarität, Phasenlage, Zeitparameter) im Hinblick auf die Beurteilung und Lokalisierung von Teilentladungen.

Literatur

[1] Partial discharge measurements. IEC-Publikation 270 (1981)
[2] *Kreuger, F. H.:* Discharge Detection in High Voltage Equipment. London, Temple Press 1964

EA 5669

Zur Bewertung der Teilentladungsbeständigkeit von Kunststoffisolator-Oberflächen[1)]

W. Menzel, KDT; R. Bärsch, KDT; J. Pilling, KDT; Zittau

Verwendete Formelzeichen und Indizes

d	Schichtdicke des Isolierlackanstriches
I_{TE}	Teilentladungsstrom
l	Länge der Teilentladung
m	Stichprobenumfang
t_{LB}	Lichtbogenstehzeit
t_{Me}	Morgensterneinsatzzeit
$\hat{U}_b$	Scheitelwert der beanspruchenden Spannung
$\ddot{u}_K$	Kriechüberschlagstrecke
ε	statistische Sicherheit
$\varkappa_S$	Schichtleitfähigkeit

Häufige Ursache für Teilentladungen auf Oberflächen von Kunststoffisolierungen sind elektrolytisch-leitfähige Fremdschichtbeläge oder konstruktiv bedingte örtliche Feldstärkeerhöhungen. Teilentladungen führen zu irreversiblen Schädigungen an den Isolierstoffoberflächen, in deren Folge Überschläge auftreten können.
Aus diesem Grund ist bereits bei der Auswahl der Isolierstoffe deren relative Beständigkeit gegenüber Oberflächenteilentladungen zu berücksichtigen. Oberflächenbeschichtungen, z.B. Isolierlackanstriche, werden aus technischen aber auch ästhetischen Gründen an Hochspannungsisolierungen vorgenommen. Es ist der Frage nachzugehen, inwieweit dadurch die Beständigkeit gegenüber Teilentladungen verbessert werden kann.

1. Elektrische Alterung von Kunststoffisolierungen durch Oberflächenteilentladungen

Elektrische Teilentladungen an Oberflächen von Kunststoffisolierungen führen im wesentlichen zu folgenden physikalisch-chemischen Vorgängen (Tafel 1):

a) elektroerosive Abtragung von Isolierstoffmaterial
b) chemische Zersetzung der umgebenden Atmosphäre bzw. des Isolierstoffes
c) lokal-thermische Abspaltung von Isolierstoffmaterial.

Die elektroerosive Abtragung von Isolierstoffmaterial (Tafel 1/Spalte 1) wird durch einen Glanzverlust bzw. Aufrauhung der Oberfläche sichtbar. Dieser Vorgang tritt bereits bei stromschwachen Glimmentladungen, mitunter auch als Mikroentladungen bezeichnet [1], auf. Aufgerauhte Isolierstoffoberflächen führen zu einer besseren Anlagerung flüssiger und fester Fremdschichten, dadurch steigt die Schichtleitfähigkeit $\varkappa_S$ bei gleichen äußeren Klimabedingungen und somit auch die Stromstärke der Teilentladungen. Die Benetzung von technisch sauberen Kunststoffoberflächen erreicht nach einer bestimmten Einwirkzeit von Teilentladungen in Form eines Filmbelages einen Endzustand [2].
Infolge chemischer Reaktionen zwischen Elektronen bzw. Ionen der Teilentladungen und neutralen Gasmolekülen bzw. -atomen entstehen Zersetzungsprodukte (Tafel 1/Spalte 2). Durch vorhandenes Wasser bildet sich als Folgereaktion beispielsweise Salpetersäure, wodurch sich ebenfalls die Schichtleitfähigkeit erhöht. Außerdem sind chemische Reaktionen von Zersetzungsprodukten mit dem Isolierstoff, z.B. ein oxydativer Abbau von Makromolekülen nach Diffusion von atomarem Sauerstoff [3], möglich, die zur Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit im Isolierstoff oder zur Verringerung der thermischen Beständigkeit [4] führen können.
Beide Vorgänge, die elektroerosive Abtragung und die chemische Zersetzung durch Teilentladungen, laufen gleichzeitig ab, d.h., eine zunächst von den äußeren Klimabedingungen beeinflußte elektrolytisch leitfähige Fremdschicht wird durch die Verbesserung der Benetzungseigenschaften des Isolierstoffes und die Leitfähigkeitserhöhung „umgebildet". Diese sogenannte elektrolytische Teilentladungserosion [1] verringert die Überschlagspannung einer befeuchteten Isolierung in gleicher Weise wie eine zusätzliche äußere Verschmutzung.
Die lokal-thermische Abspaltung von Isolierstoffmaterial infolge Teilentladungseinwirkung (Tafel 1/Spalte 3) führt entweder zur Bildung leitfähiger Kriechspuren oder zu tiefgrabenden Erosionen (Lochfraß). Der längenbezogene elektrische Widerstand einer kohlenstoffhaltigen Kriechspur ist geringer als der der sie verursachenden Teilentladung. Die Lebensdauer kriechspurbehafteter Kunststoffisolierungen ist für ökonomisch sinnvolle spezifische Beanspruchungen $\hat{U}_b/\ddot{u}_k$ zu gering [5], so daß Kriechspuren zu vermeiden sind.
Mit unterschiedlichen Prüfverfahren [2] [6] wurde ermittelt, daß der Bildung einer Kriechspur stets eine hellweiße Entladung mit einem Durchmesser von 1 bis 2 mm vorausgeht. Man bezeichnet diese Erscheinung auch als „Morgenstern". Für dessen Einsatz ist maßgebend, wie lange und mit welcher Intensität eine Teilentladung einen bestimmten Oberflächenabschnitt beansprucht. Bei örtlich und zeitlich kontinuierlicher Einwirkung von Teilentladungen nimmt die Zeit bis zum Morgensterneinsatz zu, wenn deren längenbezogene zugeführte elektrische Leistung bzw. der Strom geringer werden [2]. Unterhalb bestimmter vom Isolierstoff abhängiger Leistungen bzw. Ströme kommt es nicht mehr zum Morgenstern. Sowohl die Morgensterneinsatzzeiten als auch die Grenzleistungen bzw. -ströme sind von den Brennbedingungen einer Teilentladung, d.h. u.a. von der Spannungsart (Gleichspannung, Wechselspannung, Impulsspannung) und der Geometrie der Elektroden bzw. der Isolierstoffoberfläche abhängig (vgl. Abschn. 3.).
In vielen Fällen geht einer lokal-thermischen Zerstörung einer Isolierstoffoberfläche die elektrolytische Teilentladungserosion voraus. Somit könnte man auch von einer „Alterungsfrühphase" und einer intensiveren „Alterungsspätphase" sprechen [7]. Andererseits haben Untersuchungen mit Impulsspannungen ergeben, daß z.B. an einer Hartpapieroberfläche mit einer Schichtleitfähigkeit $\varkappa_S = 100\ \mu S$ und einer spezifischen Beanspruchung $\hat{U}_{b/\ddot{u}k} = 2\,\frac{kV}{cm}$ ein Impuls (700/10000) ausreicht, um eine Kriechspur ohne vorangegangene Oberflächenerosion zu bilden. In diesem Fall wurde nur eine einzige

Tafel 1
Vorgänge, Alterungserscheinungen und Wirkungen durch Teilentladungen an befeuchteten Isolierstoffoberflächen

	1	2	3
Physikalisch-chemischer Vorgang	**Elektroerosive Abtragung** von Isolierstoffmaterial	**Chemische Zersetzung** der umgebenden Atmosphäre bzw. des Isolierstoffes	**Lokal-thermische Abspaltung** von Isolierstoffmaterial
Alterungserscheinungen/ Folgereaktionen an Isolierstoffoberflächen	Glanzverlust Aufrauhung Rißbildung	beispielsweise Bildung von O_3, O, N, NHO_3 Aufspaltung makromol. Verbindungen	Kriechspurbildung tiefgrabende Erosion (Lochfraß)
Wesentliche Wirkungen	Verbesserung der Benetzung der Isolierstoffoberfl.	Erhöhung der Schichtleitfähigkeit	Erhöhung der Leitfähigkeit im Isolierstoff
	verbesserte Anlagerung fester Fremdschichten	Erhöhung der Leitfähigkeit im Isolierstoff	Verringerung der mechanischen und elektrischen Festigkeit des Isolierstoffes
	Erhöhung der Schichtleitfähigkeit	Verringerung der thermischen Beständigkeit	

Dipl.-Ing. *Wolfgang Menzel* ist wissenschaftlicher Assistent an der Sektion Elektroenergieversorgung der Ingenieurhochschule Zittau. Dr.-Ing. *Roland Bärsch* ist Entwicklungsingenieur im VEB Kabelwerk Nord Schwerin. Prof. Dr. sc. techn. *Jürgen Pilling* ist Professor für Hochspannungstechnik an der Sektion Elektroenergieversorgung der Ingenieurhochschule Zittau.

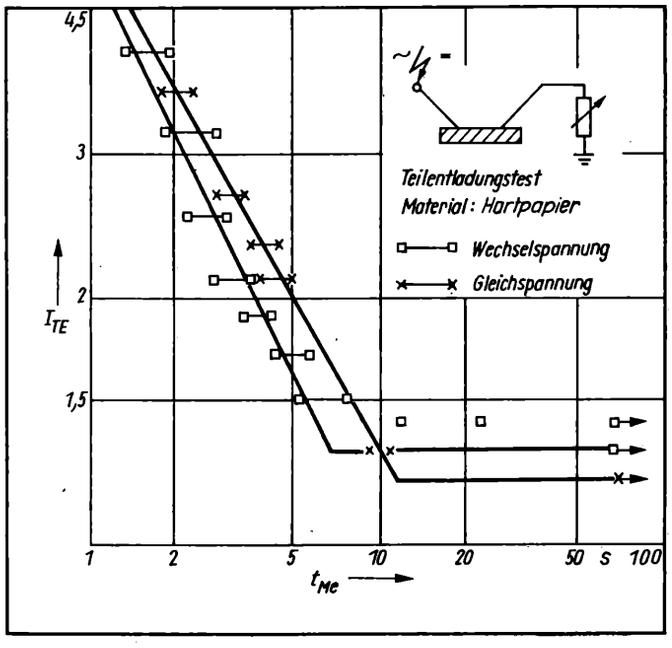
[1)] Die Autoren danken Herrn Prof. Dr.-Ing. *Kahle* (THI) für die Bereitstellung von Prüfgeräten und der FKG ELTRA für die Förderung der Arbeiten.

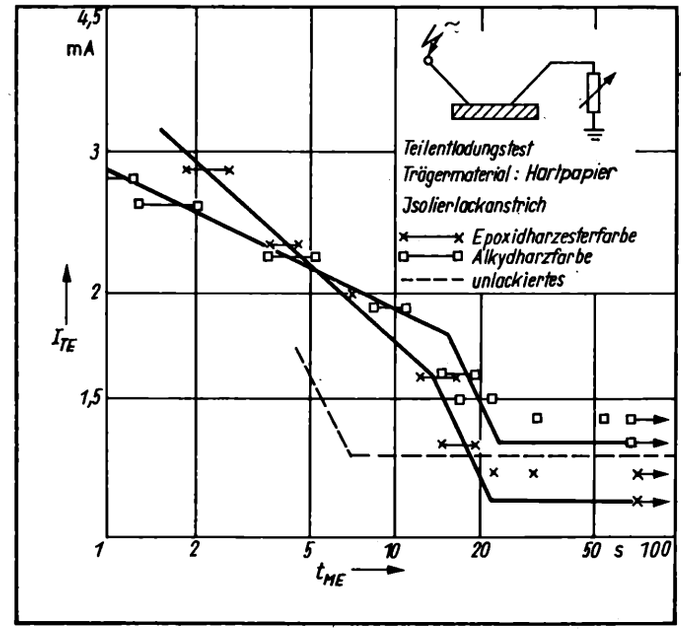
Tafel 2
Ausgewählte Prüfverfahren zur Bewertung der Beständigkeit von Isolierstoffen gegenüber Oberflächenteilentladungen

Werkstoffprüfverfahren (Auswahl)	Standard (Auswahl)	Art der Gasentladung	Spez. Spannungsbedarf $\hat{U}b/l$ in Luft in kV/cm	Mittl. Teilentladungsstrom $\bar{I}_{TE}$ in mA	Stabilisierung der Teilentladung	Bewertungskriterium (Auswahl)
Glimmfestigkeit	VDE 0303 [8]	Glimmentladung (Streamerentladung)	25···30	< 1	Elektroden	Erosion/ Durchschlagkanal
Lichtbogenfestigkeit	TGL 0-53484 [9]	Lichtbogen	1··· 2	10···40	Elektroden	Erosion Kriechspuren
Schiefe-Ebene-Test	ASTM D 2303-73 [10]	Vorlichtbogen, Lichtbogen	1··· 2	≦ 60	Elektrode/ Fremdschicht	Morgensterneinsatz
Kriechstromfestigkeit	IEC 112 [11]	Vorlichtbogen Lichtbogen	0,5···1	≦ 500		

Bild 1. Morgensterneinsatzcharakteristik für Hartpapier
Parameter: Spannungsart

Bild 2. Morgensterneinsatzcharakteristik für Hartpapier;
Parameter: Isolierlackanstrich (Schichtdicke 130 µm)





Teilentladung über einer definierten Trockenzone gezündet. Wenn sich der Ort der Teilentladung durch thermische Vorgänge in der Fremdschicht stochastisch verändert, so nimmt die Anzahl der erforderlichen Impulsbeanspruchungen bis zur Kriechspurbildung bei gleicher Schichtleitfähigkeit zu.

2. Zur Auswahl eines Alterungsprüfverfahrens

Um einen zuverlässigen Einsatz von Kunststoffisolierungen auch beim Auftreten elektrolytisch-leitfähiger Beläge zu ermöglichen, ist die zulässige Grenzflächenbelastung $\hat{U}_b/\ddot{u}_k$ und $\varkappa_S$ zu ermitteln, die mit Sicherheit noch nicht zum Morgensterneinsatz führt. Bei der Abschätzung dieser Werte sollte man vom ungünstigsten Beanspruchungsfall, der Einwirkung einer örtlich und zeitlich stabilisierten Oberflächenteilentladung, ausgehen. Das heißt, daß die „Beständigkeit" eines organischen Isolierstoffes gegenüber derartigen Oberflächenteilentladungen mit einem geeigneten Alterungsprüfverfahren nachzuweisen ist. Bei der Festlegung eines Prüfverfahrens sind vor allem folgende Gesichtspunkte von Interesse:

1. Erzeugung der Teilentladung und deren Stabilisierung auf der Isolierstoffoberfläche
2. Höhe des Teilentladungsstromes bzw. der zugeführten Teilentladungsleistung
3. Bewertungskriterium, z. B. Morgensterneinsatz, leitende Brücke, Schmelzen, Erosionsvolumen.

Aus Untersuchungen ist bekannt, daß für den Einsatz von Morgensternen, die auf einem bestimmten Oberflächenabschnitt der Isolierung umgesetzte Leistungsdichte der äußeren Teilentladung maßgebend ist. Das Problem besteht darin, den „thermisch wirksamen" Anteil direkt zu messen, so daß man auf proportionale Größen — z. B. die zugeführte elektrische Teilentladungsleistung — zurückgreifen muß. Davon ausgehend, daß die Gasentladungen — angefangen von funkenartigen Entladungen bis hin zum Lichtbogen — einer entsprechenden U-I-Charakteristik unterliegen, kann jeder umgesetzten Teilentladungsleistung ein definierter Teilentladungsstrom zugeordnet werden.

Die bekannten Prüfverfahren unterscheiden sich in diesen Parametern (Tafel 2) und führen deshalb bei einem Isolierstoff zu unterschiedlichen Ergebnissen. Die Ursachen hierfür liegen vor allem in der unterschiedlichen für die Isolierstofferwärmung wirksamen Teilentladungsleistung [2]. Außerdem wird die Teilentladung nicht in jedem Falle örtlich stabilisiert. Gut reproduzierbare Ergebnisse erhält man mit einem sogenannten „Teilentladungstest", mit dem, bei Einwirkung einer örtlich und zeitlich stabilisierten Teilentladung, die Zeit bis zum Einsatz eines Morgensterns bewertet wird. Der Aufbau entspricht etwa dem Prüfverfahren zur Ermittlung der Lichtbogenfestigkeit [9]. Zwei Wolframspitzenelektroden, die sich um jeweils 45° zur Isolierstoffebene geneigt im Abstand von 5 mm gegenüberstehen, bilden eine Funkenstrecke. Während eine Elektrode unmittelbar an Hochspannung angeschlossen wird, ist die andere Elektrode über einen einstellbaren Widerstand zu erden. Die plattenförmigen Prüfkörper werden auf einen senkrecht beweglichen Tisch gelegt und nachdem eine Entladung mit dem gewünschten Teilentladungsstrom I_{TE} eingestellt ist — an die Elektroden herangeführt. Unter diesen Bedingungen treten bei vielen organischen Isolierstoffen Morgensterne bereits bei einem Teilentladungsstrom von wenigen Milliampere auf.

Bei der Messung der Abhängigkeit des Teilentladungsstromes I_{TE} von der Morgensterneinsatzzeit t_{Me} — der Morgensterneinsatzcharakteristik — werden jeweils für einen konstanten Strom Vertrauensbereiche für t_{Me} ermittelt (Normalverteilung, $m = 10$, $\varepsilon =$

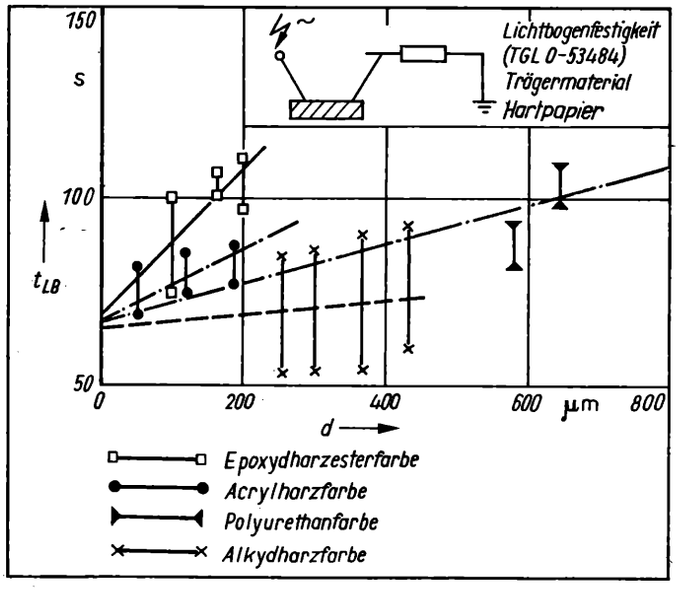


Bild 3. Einfluß der Schichtdicke des Isolierlackanstriches auf die Lichtbogenstehzeit; *Parameter:* Isolierlackanstrich

0,95). Um den Teilentladungsgrenzstrom zu ermitteln, wird der Strom in Schritten von 0,1 mA verringert, bis innerhalb von 2 Stunden kein Morgenstern mehr registriert wird. Dieser Grenzstrom wird ebenfalls mit 10 Prüfkörpern gesichert. Die Beschränkung auf 2 Stunden erscheint aus praktischen Gründen sinnvoll. Es ist nachgewiesen worden, daß auch bei weiterer Beanspruchung in der Regel kein Morgenstern mehr auftritt, da nach 2 Stunden im allgemeinen eine quasi stationäre Temperaturverteilung erreicht ist. Um das Auftreten eines Morgensternes zu vermeiden, darf demzufolge der Strom den Teilentladungsgrenzstrom nicht überschreiten. Die Kennwerte der Morgensterneinsatzcharakteristik (Lage, Anstieg und Teilentladungsgrenzstrom) sind wesentlich von Isoliereigenschaften, wie thermische Stabilität der chemischen Verbindungen und Wärmeleitfähigkeit sowie von dem für die Erwärmung des Isolierstoffes wirksamen Anteil der umgesetzten Teilentladungsleistung abhängig (Bild 1). Dieser wirksame Anteil wird auch durch die Spannungsart beeinflußt. Im Falle von Hartpapier sind die Morgensterneinsatzcharakteristiken für Gleich- und Wechselspannung nahezu identisch. Bei beständigeren Isolierstoffen, z.B. bei Epoxidharz, erhält man für Gleichspannung kleinere Teilentladungsgrenzströme im Vergleich zur Wechselspannung.
Mit Hilfe der Morgensterneinsatzcharakteristik ist eine relative Bewertung der Isolierstoffe im Sinne einer Skalierung möglich. Der isolierstoffspezifische Teilentladungsgrenzstrom kann jedoch auch einer absoluten Bewertung zugrunde gelegt werden.

3. Teilentladungsbeständigkeit von Isolierlackanstrichen

Nachfolgend sollen einige Untersuchungsergebnisse vorgestellt werden, die die Wirkung von Isolierlackanstrichen auf organischen Isolierstoffen veranschaulichen. Die Betrachtungen beschränken sich dabei auf Hartpapier als Trägermaterial, da dessen begrenzte Beständigkeit gegenüber Oberflächenteilentladungen allgemein bekannt ist.
Besitzt der Isolierlack eine größere Beständigkeit als das Trägermaterial, so verzögert sich der Morgensterneinsatz, da das unmittelbar beanspruchte oberflächennahe Volumen aus dem relativ beständigen Isolierlack besteht (Bild 2). Wirkt die Teilentladung mit einem Strom auf die Oberfläche ein, der in der Anstrichschicht zu keinem Morgensterneinsatz mehr führt, so wird der Isolierlack zunächst erosiv abgetragen. Die Morgensterneinsatzcharakteristik folgt dann — quasi zeitlich verzögert — der Kennlinie für den unlackierten Isolierstoff. Die zeitliche Verzögerung des Morgensterneinsatzes kann auch durch die Schichtdicke d des Isolierlackanstriches vergrößert werden (Bild 3). Da der Teilentladungsgrenzstrom unverändert bleibt, soll der erzielte Effekt durch die Bestimmung der Lichtbogenfestigkeit [9] (Normalverteilung, $m = 20$, $\varepsilon = 0{,}95$) veranschaulicht werden. Die Lichtbogenstehzeit t_{LB} (hier die Zeit bis zum Ausbilden einer Kriechspur) vergrößert sich mit der Schichtdicke d für relativ beständige Isolierlacke. Obere Grenze ist dabei die Lichtbogenstehzeit des Isolierlackes, die bei Schichtdicken erreicht wird, bei denen das Trägermaterial die Kriechspurbildung nicht mehr beeinflußt. Der Anstieg der Kurven $t_{LB} = f(d)$ ist jedoch kein absolutes Bewertungsmaß für die erreichte Verbesserung, da die Zeit bis zum Kriechspur- bzw. Morgensterneinsatz auch von der Stromstärke abhängig ist (Bild 2).

4. Schlußfolgerungen

Der Vorteil des Teilentladungstestes gegenüber anderen bekannten Prüfverfahren besteht darin, daß mit der Morgensterneinsatzcharakteristik der Zusammenhang zwischen äußerer elektrischer Beanspruchung bzw. Fremdschichtbelastung und dem Einsatz der intensiven Zerstörungsphase (Morgensterneinsatz) hergestellt werden kann. Bei Einhaltung des isolierstoffspezifischen Teilentladungsgrenzstromes wird auch für den ungünstigsten Fall einer örtlich und zeitlich stabilen Teilentladung ein Morgensterneinsatz verhindert. Durch Isolierlackanstriche ist die Verzögerung des Morgensterneinsatzes möglich, wenn der Isolierlack im Vergleich zum Trägermaterial beständiger gegenüber Teilentladungseinwirkung ist. Die Teilentladungsbeständigkeit ist auch von der Spannungsart abhängig. Letztlich sollten die mit dem Isolierstoffprüfverfahren (Teilentladungstest o.a.) gewonnenen Aussagen durch ein praxisnahes Prüfverfahren, bei dem der Teilentladungsstrom durch die tatsächliche elektrische Beanspruchung, die Geometrie der Isolierung und die äußere Fremdschichtbelastung bestimmt wird, bestätigt werden.

Literatur

[1] *König, D.; Müller, B.:* Neuere Erkenntnisse über Vorgänge auf feuchten Epoxidharz-Formstoff-Oberflächen bei Hochspannungsbeanspruchung. 28. Intern. Wiss. Koll. TH Ilmenau, 1983, Konferenzband H. 2, S. 171—174
[2] *Post, H.-G.:* Zur Alterung und zum Überschlag von Kunststoffisolierungen mit leitfähigen Fremdschichten bei Wechselspannung. Dissertation A, IH Zittau 1985
[3] *Feichtmayr, F.;* u.a.: Abbau von Polyäthylen und Polyvinylchlorid in elektrischen Teilentladungen. Kunststoffe 64 (1974) 8, S. 405—409
[4] *Lebok, F.:* Die Dauerwärmebeständigkeit von Isolierlacken als reaktionskinetisches Problem. Deutsche Farben Zeitschrift 15 (1961) 9, S. 378—385
[5] *Bärsch, R.;* u.a.: Zur Gestaltung von Kunststoff-Innenraumisolierungen unter dem Gesichtspunkt zeitweiliger Taubeläge. ELEKTRIE, Berlin 36 (1982) 11, S. 587—591
[6] *Schulte, D.:* Untersuchungen zum Oberflächenverhalten organischer Isolierstoffe für Freiluft-Hochspannungs-Anwendung. Dissertation, TU Braunschweig 1982
[7] *König, D.;* u.a.: Beitrag zur Spezialisierung eines Alterungstests für Isolierungen gekapselter luftisolierter Innenraumschaltanlagen. ETG-Fachtagung Sept. 1985 in Berlin-West, Tagungsband
[8] VDE 0303; Teil 7 Bestimmungen für elektrische Prüfungen von Isolierstoffen. Verhalten unter Einwirkung von Glimmentladungen. Ausg. September 1974
[9] TGL 0-53484/01 Bestimmung der Lichtbogenfestigkeit, Verfahren mit anliegenden Elektroden. Ausg. Juli 1975
[10] ASTM D 2303-73 Standardisiertes Prüfverfahren mit flüssiger Verschmutzung an einer schiefen Ebene für Kriechspuren und Erosion von Isolierstoffen (engl.).
[11] IEC 112 Bestimmung einer Vergleichskennziffer für die Kriechstromfestigkeit von festen Isolierstoffen unter Einfluß von Feuchtigkeit. Ausg. 1979

EA 5680

Haben Sie Interesse, eine Tätigkeit in unserem Verlag aufzunehmen?

Wir bieten einem

Diplomingenieur der Elektrotechnik

möglichst mit Berufserfahrung auf dem Gebiet der Starkstromtechnik, eine vielseitige, interessante Arbeitsmöglichkeit als Redakteur in der Redaktion unserer Fachzeitschrift ELEKTRIE.

Wenn Sie diese Aufgabe reizt, wenden Sie sich bitte direkt an den

VEB Verlag Technik
Oranienburger Straße 13/14
Berlin
1020

Abteilung Elektrotechnik
Tel. 2870330
2870345

Berechnung des elektrischen Feldes kugelförmiger Teller-Segmentelektroden

S. Rausendorf, KDT; W. Schufft, KDT; Dresden

Mitteilung aus dem VEB Transformatoren- und Röntgenwerk „Hermann Matern" Dresden

Verwendete Formelzeichen

a_T	Tellerabstand
d_T	Tellerdurchmesser
$E(x)$	elektrische Feldstärke in Abhängigkeit des Weges
E_{hg}	Höchstfeldstärke einer Elektrode mit geschlossener Oberfläche
E_{hK}	Höchstfeldstärke der Hüllkugel
E_{hS}	Höchstfeldstärke der Segmentkugel
E_{hT}	Höchstfeldstärke einer Teller-Segmentelektrode
h_T	Tellerhöhe
k_{sE_h}	Segmentierungsfaktor der Höchstfeldstärke
P_{ij}	Potentialkoeffizient
r_T	Abrundungsradius des Tellers
x_{Ki}	x-Koordinate des i-ten Konturpunktes
x_{Lj}	x-Koordinate der j-ten Ladung
y_{Ki}	y-Koordinate des i-ten Konturpunktes
y_{Lj}	y-Koordinate der j-ten Ladung
z_{Ki}	z-Koordinate des i-ten Konturpunktes
z_{Lj}	z-Koordinate der j-ten Ladung
β, γ, δ	Hilfswinkel zum Beschreiben des kleinsten feldgleichen Segmentes
ε	absolute Dielektrizitätskonstante
$\boldsymbol{P}$	Matrix der Potentialkoeffizienten
$\boldsymbol{Q}$	Vektor der Ladungen
$\boldsymbol{U}$	Vektor der Spannungen

Für die Ausrüstungen moderner Hochspannungs-Prüfanlagen und beim Aufbau TE-freier bzw. TE-armer Hochspannungs-Prüfkreise kommen in zunehmendem Maße Elektroden zum Einsatz, die aus Tellerelektroden zusammengesetzt sind [1] [2] [3]. Solche Elektroden sind international unter dem Begriff „Polyconelektroden" bekannt. Sie weisen gegenüber Elektroden mit abgeschlossener Oberfläche wesentliche fertigungs-, montage- und transporttechnologische Vorteile auf. Als Baukastensystem angeboten, sind sie für viele Prüfzwecke variabel einsetzbar [4].

Um einzelne Teller sowie Teller-Segmentelektroden optimal gestalten zu können, ist die Kenntnis des elektrischen Feldes notwendig. Die Feldberechnung stellt hierbei ein dreidimensional zu berechnendes Problem dar, d.h., es besteht keine Rotationssymmetrie. *Singer* [5] gelingt die Berechnung von in der Ebene angeordneten Tellern mit einer parallelen Ebene als Gegenelektrode unter Ausnutzung aller Symmetrieeigenschaften. Bei den im VEB TuR Dresden entwickelten Teller-Segmentelektroden werden die Teller in dichtester Packung angeordnet, um eine vorgegebene Elektrodenform mit möglichst wenigen großen Tellern anstelle von vielen kleineren nachbilden und damit ein einfaches Stützgerät realisieren zu können [4]. So werden kugelförmige Teller-Segmentelektroden von regulären Polyedern abgeleitet. Diese weisen besondere Symmetrieeigenschaften auf, die bei der Berechnung kugelförmiger Segmentelektroden als „Anordnung frei im Raum" ausgenutzt werden können. Aus der so ermittelten Feldverteilung können die Feldstärken beliebiger Teller-Segmentelektroden abgeschätzt werden.

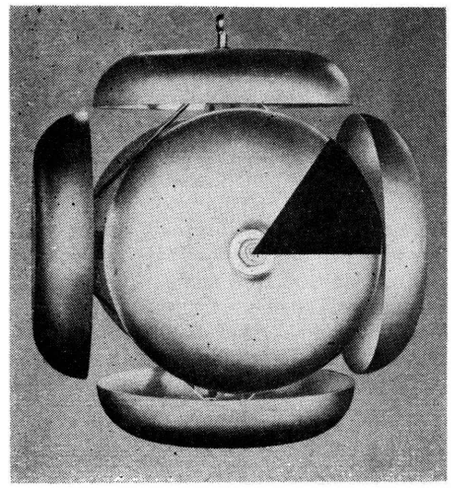
1. Mathematisches Modell

1.1. Auswahl des Berechnungsverfahrens

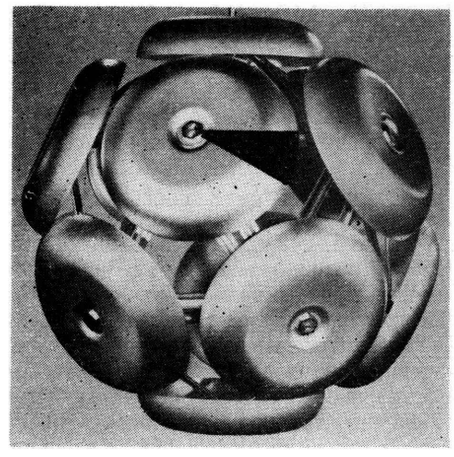
Die bekanntesten Verfahren zur Feldberechnung führen bei Teller-Segmentelektroden auf Grund der begrenzten Zahl der vorgebbaren

Dr.-Ing. *Siegmar Rausendorf* und Dipl.-Ing. *Wolfgang Schufft* sind Entwicklungsingenieure im Anlagenlabor des VEB Transformatoren- und Röntgenwerk „Hermann Matern" Dresden.

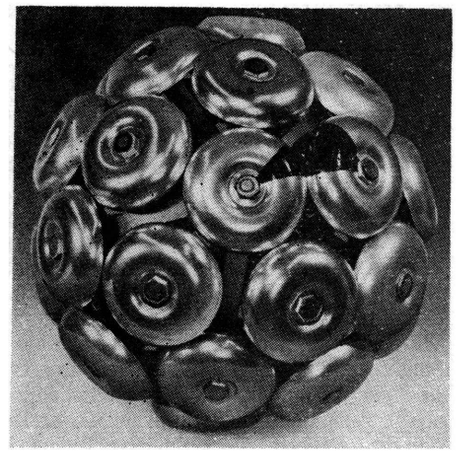
Bild 1
Teller-Segmentlektroden



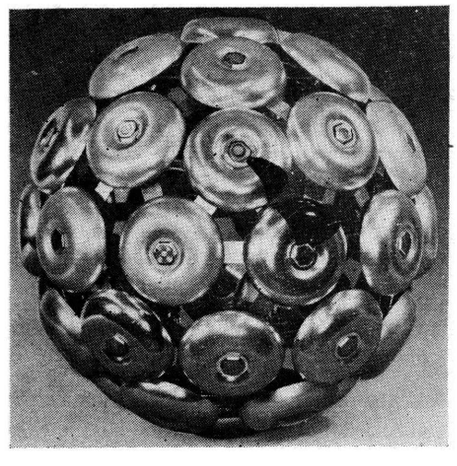
a) Sechs-Tellerelektrode;



b) Zwölf-Tellerelektrode;



c) 32-Tellerelektrode;



d) 42-Tellerelektrode

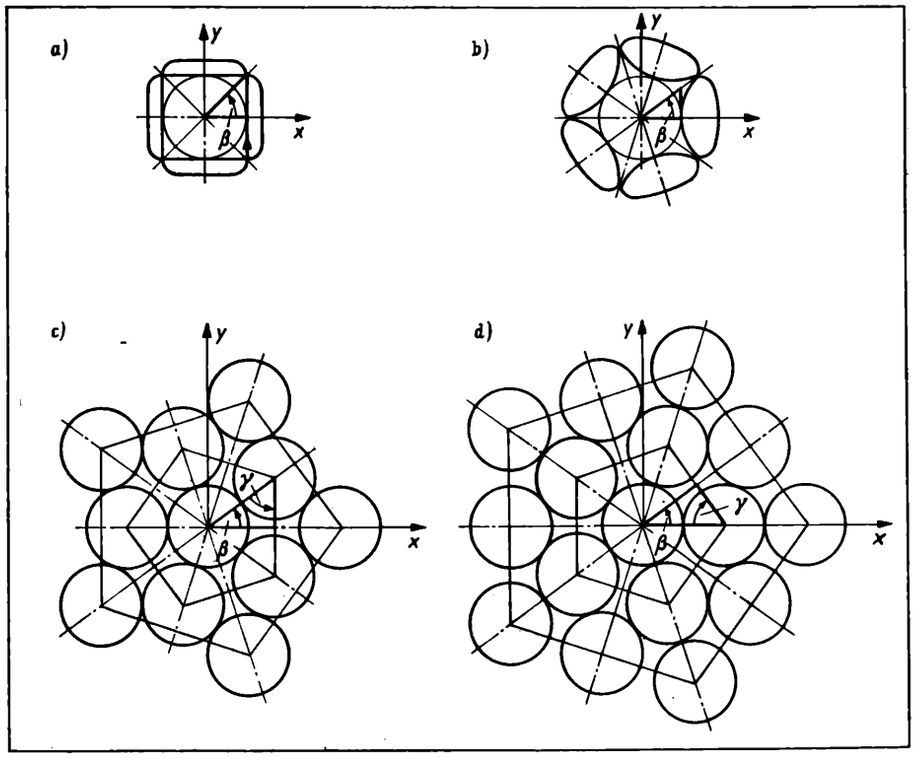


Bild 2. Feldgleiche Segmente der *a*) Sechs-Tellerelektrode; *b*) Zwölf-Tellerelektrode; *c*) 32-Tellerelektrode; 42-Tellerelektrode

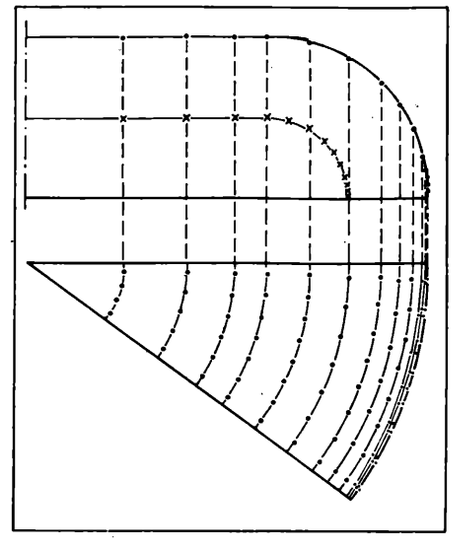


Bild 3. Anordnung von Ladungen (*x*) und Konturpunkten (·)

Randbedingungen — selbst bei Verwendung von Großrechnern — zu nicht vertretbaren Modellierungs- und damit auch Berechnungsfehlern. Da allerdings einige der im VEB TuR Dresden hergestellten Teller-Segmentelektroden völlig symmetrisch sind (alle Elektroden, deren Stützgerüste reguläre bzw. halbreguläre Polyeder bilden), genügt die mathematische Modellierung eines kleinen Teiles der Elektrode — im weiteren als „kleinstes feldgleiches Segment" bezeichnet — zur wirklichkeitsnahen Nachbildung von Teller-Segmentelektroden. Zur Simulation dieses kleinsten feldgleichen Segmentes haben sich Punktladungen des Ladungsverfahrens (Charge Simulation Method) [6] als geeignet erwiesen, weshalb diese zur Anwendung kommen.

1.2. Definition der kleinsten feldgleichen Segmente

Das vorgestellte Verfahren soll für zwei auf reguläre (Sechs- und Zwölf-Tellerelektrode) und zwei auf halbreguläre (32- und 42-Tellerelektrode) Polyedern basierenden Teller-Segmentelektroden beschrieben werden (Bilder 1a bis 1d).

Unter feldgleichem Segment wird ein Elektrodenausschnitt verstanden, der nach einer eindeutigen Bildungsvorschrift sich mit unterschiedlichen Koordinaten endlich viele Male auf der Elektrode wiederholt und als Elektrodenanordnung „frei im Raum" jeweils identische Feldverhältnisse aufweist. Für die Sechs-Tellerelektrode umfaßt das kleinste dieser feldgleichen Segmente 1/8 eines Tellers (Bild 2a), für die Zwölf-Tellerelektrode 1/10 eines Tellers (Bild 2b), für die 32-Tellerelektrode 1/10 eines Tellers und 1/6 eines benachbarten Tellers (Bild 2c) sowie für die 42-Tellerelektrode 1/10 eines Tellers und 1/4 eines benachbarten Tellers (Bild 2d).

1.3. Anordnung der Ladungen und Konturpunkte

Die infolge der limitierten Hauptspeicherkapazität des verwendeten Digitalrechners begrenzte Ladungszahl muß nicht, wie sonst bei nicht-rotationssymmetrischen Anordnungen üblich, zur Nachbildung der Gesamtanordnung verwendet werden. Vielmehr stehen alle Ladungen zur Simulation des kleinsten feldgleichen Segmentes, welches 48mal bei der Sechs-Tellerelektrode bzw. 120mal bei der Zwölf-, 32- und 42-Tellerelektrode existiert, zur Verfügung. Die Anordnung der Ladungen und Konturpunkte auf den im Abschn. 1.2. definierten Segmenten erfolgt auf Kreisbahnen, wobei der Abstand derselben untereinander vom Tellermittelpunkt zum -rand abnimmt.

Bild 3 zeigt die Verteilung von Ladungen und Konturpunkten auf dem Segment einer Zwölf-Tellerelektrode, welche für alle hier beschriebenen Teller-Segmentelektroden repräsentativ ist.

1.4. Algorithmus zur Berechnung der Potentialkoeffizienten

Die Anordnung der z. B. für die EDVA EC 1040 zur Verfügung stehenden 140 Punktladungen auf dem kleinsten feldgleichen Segment ist auf Grund der völligen Symmetrie gleichbedeutend mit der Anordnung von 6720 Ladungen bei der Sechs-Tellerelektrode bzw. von 16800 Ladungen bei der Zwölf-, 32- und 42-Tellerelektrode. Aus dem Gleichungssystem des Ladungsverfahrens

$$\boldsymbol{P} \cdot \boldsymbol{Q} = \boldsymbol{U} \tag{1}$$

ist zu erkennen, daß der Einfluß der Ladungen aller nichtbeschriebenen feldgleichen Segmente lediglich in den Potentialkoeffizienten P_{ij} berücksichtigt werden muß. Da P_{ij} den Beitrag der j-ten Ladung auf den i-ten Konturpunkt charakterisiert, beschränkt sich die Berücksichtigung aller nicht beschriebenen Segmente auf die Bestimmung der reziproken Abstände des Konturpunktes i zu allen j Ladungen nach

$$P_{ij} = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \sum_{k=1}^{n} \frac{1}{\sqrt{(x_{Ki} - x_{Ljk})^2 + (y_{Ki} - y_{Ljk})^2 + (z_{Ki} - z_{Ljk})^2}} \tag{2}$$

$i = 1, \ldots, 140$
$j = 1, \ldots, 140$
$n = 48$ bzw. 120.

Dabei werden die Koordinaten der Ladungen und Konturpunkte des beschriebenen Segmentes in cartesischer Form vorgegeben, wogegen die Ladungskoordinaten aller nichtbeschriebenen Segmente durch Koordinatentransformation sowie Umwandlungen zwischen cartesischen, Kugel- und Zylinderkoordinaten berechnet werden.

2. Digitales Rechenprogramm

2.1. Allgemeines

Das im Abschn. 1. beschriebene mathematische Modell wurde in Unterprogrammen, die in das Programmpaket FELDGF[1]) eingepaßt wurden, rechentechnischen für die EDVA EC 1040 realisiert. Die Programmierung erfolgte in der problemorientierten Programmiersprache FORTRAN. Der Speicherplatz für die Programmversion

— 140 Ladungen und Konturpunkte
— 5 verschiedene Dielektrika
— 9 Grenzflächen
— 5 Elektroden auf freiem Potential

beträgt 166 KBytes und gestattet nach der Berechnung der Ladungsgrößen die Berechnung von

— Feldstärke und Potential in den Kontur-, Test-, Grenzflächen- und Grenzflächentestpunkten

[1]) Der Quelltext für die EDVA BESM-6 wurde freundlicherweise vom Bereich Hochspannungstechnik der Sektion Elektrotechnik der Technischen Universität Dresden zur Verfügung gestellt. Herrn Dr.-Ing. *Joachim Speck* sei an dieser Stelle für die jederzeit konstruktive Zusammenarbeit gedankt.

— Feldlinien
— Äquipotentiallinien
— Grenzflächen sowie
— Durchschlaghöchstfeldstärke und Durchschlagspannung in SF_6 und in Luft.

Die Rechenzeit beträgt auf Grund der aufwendigen Berechnung der Potentialkoeffizienten 1860″ ··· 4450″ bis zur Berechnung der Feldstärke in den Konturpunkten und 21″ ··· 128″ zur Berechnung eines Punktes einer Äquipotentiallinie (die minimalen Zeiten gelten für die Sechs-Tellerelektrode und die maximalen Zeiten für die 42-Tellerelektrode).

2.2. Unterprogramme zum Berechnen von Teller-Segmentelektroden

2.2.1. Berechnung der Ladungs- und Konturpunktkoordinaten

Die Eingabe der Koordinaten für Ladungen und Konturpunkte würde, da das kleinste feldgleiche Segment eine dreidimensionale Anordnung darstellt, einen immensen Vorbereitungsaufwand erfordern. Diese Vorbereitung läßt sich algorithmieren und daher auch programmieren. Mit Hilfe zum größten Teil konstruktiver Daten (z. B. Tellerradius, -höhe, -anzahl u. ä.) sowie diverser Steuergrößen des Programmes FELDGF kann für jede der hier beschriebenen Teller-Segmentelektroden eine vollständige Feldberechnung durchgeführt werden.

2.2.2. Berechnung der Potentialkoeffizienten

Im Programm FELDGF werden die Potentialkoeffizienten in einem separaten Unterprogramm berechnet. Zur Berechnung von Teller-Segmentelektroden mußte dasselbe derart modifiziert werden, daß die Ladungen des kleinsten feldgleichen Segmentes, welches nach Abschn. 2.2.1. erzeugt wird, bei der Sechs-Tellerelektrode verachtundvierzigfacht und bei der Zwölf-, 32- und 42-Tellerelektrode vereinhundertzwanzigfacht werden.
Diese Vervielfachung der Ladungen resultiert aus den Symmetrieeigenschaften der auf Polyeder basierenden Stützgerüste, deren rechentechnische Realisierung den Anwender in die Lage versetzt, Teller-Segmentelektroden wie Elektroden mit geschlossener Oberfläche „frei im Raum" zu berechnen.

3. Durchgeführte Berechnungen und Ergebnisse

Die berechneten Teller weisen die im Bild 4 gezeigte Form auf. Sie besitzen in ihrer Mitte einen ebenen Teil, Tellerhöhe und Tellerabrundungsradius sind identisch. Die beim realen Teller vorhandene mittige Einziehung (siehe Bilder 1 a bis 1 d) wird bei der Nachbildung nicht berücksichtigt, da deren Einfluß getrennt untersucht wurde und vernachlässigbar ist. Bei der Berechnung wird ebenfalls die Tellerzahl variiert (6, 12, 32 und 42). Der Abstand der Teller im Verband, auf den Tellerdurchmesser bezogen, beträgt 0; 0,05 und 0,1. Telleranzahl und -abstand bestimmen das zwischen den Tellern auftretende „Loch".
Die Qualität der Nachbildung wird überprüft, indem mit dem im Programm FELDGF vorhandenen Unterprogramm zur Berechnung von Äquipotentiallinien die Ist-Kontur (1,0-Äquipotentiallinie) berechnet und mit der Soll-Kontur (vorgegebene Kontur) verglichen wird. Die Nachbildung wird dann als ausreichend genau angesehen, wenn kein zeichnerisch auflösbarer Unterschied zwischen Ist- und Soll-Kontur feststellbar ist und der Betrag der Feldstärke über der Kontur keine Welligkeit aufweist. Bild 5 zeigt die Ist-Kontur einer Zwölf-Tellerelektrode, berechnet ausgehend vom Tellermittelpunkt in Richtung Tellerrand auf einer der Grenzen des feldgleichen Segmentes (vgl. Bild 2 b, $\beta = 0°$). Die Oberflächenfeldstärke ist als Vektor an den auf der Ist-Kontur berechneten Punkten angetragen.
In Bild 6 ist der Betrag der Oberflächenfeldstärke über der Elektrodenkontur dargestellt. Die Winkel $\beta = 0°$ und $\beta = 36°$ kennzeichnen die Grenzen des feldgleichen Segmentes, der Winkel $\beta = 18°$ dessen Mitte. Der Betrag der Feldstärke unterscheidet sich auf dem ebenen Teil des Tellers in den unterschiedlichen Berechnungsebenen nicht. Erst auf der Tellerkrümmung wird der Einfluß des Nachbartellers wirksam. Die Höchstfeldstärke der drei Kurven differiert aber nur um 1,5 %, ihr Maximum verschiebt sich mit Vergrößerung des Winkels β geringfügig in Richtung Tellerrand. Diese Aussagen treffen qualitativ für alle berechneten Varianten zu.
Die auf eine Elektrodenspannung von 1 kV bezogenen Feldstärken einiger der 28 berechneten Elektrodenvarianten sind über dem Hüllkugelradius (einhüllende Kugel) zusammen mit der Feldstärke der Hüllkugel in Bild 7 gezeigt. Will man eine quantitative Aussage über die durch die Segmentierung hervorgerufene Feldstärkeerhöhung treffen, so ist es sinnvoll, die ermittelten Höchstfeldstärken auf die Feldstärke der entsprechenden Hüllkugel zu beziehen. Dieser Faktor soll in Analogie zu *Maucksch* [7] Segmentierungsfaktor der Höchstfeldstärke k_{sE_h} genannt werden:

$$k_{sE_h} = \frac{E_{hS}}{E_{hK}}. \tag{3}$$

Die errechneten Segmentierungsfaktoren der Höchstfeldstärke liegen zwischen 1,4 und 1,6. Ein analoger Faktor nach *Singer* [5], der die Feldstärkeerhöhung einer ebenen Segmentelektrode („Polyconelektrode") gegen eine Platte gegenüber dem Homogenfeld mit gleichem Elektrodenabstand angibt, beträgt 1,2 bis 1,6.
Neben der Feldstärkeerhöhung durch die Segmentierung interessiert, wie weit die Segmentierung in den Raum hineinwirkt. Dazu wurde der Beitrag der Feldstärke auf der vom Ort der Höchstfeldstärke ausgehenden Feldlinie für eine Zwölf-Tellerelektrode (d_T ·

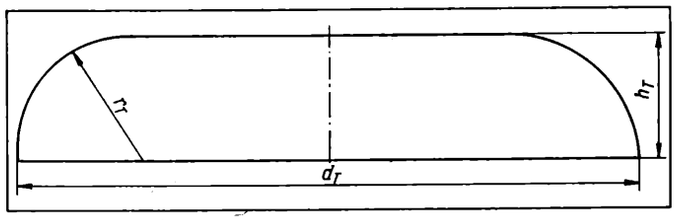


Bild 4. Tellerquerschnitt

Bild 5. Nachbildung einer Zwölf-Tellerelektrode (Ebene $\beta = 0°$)

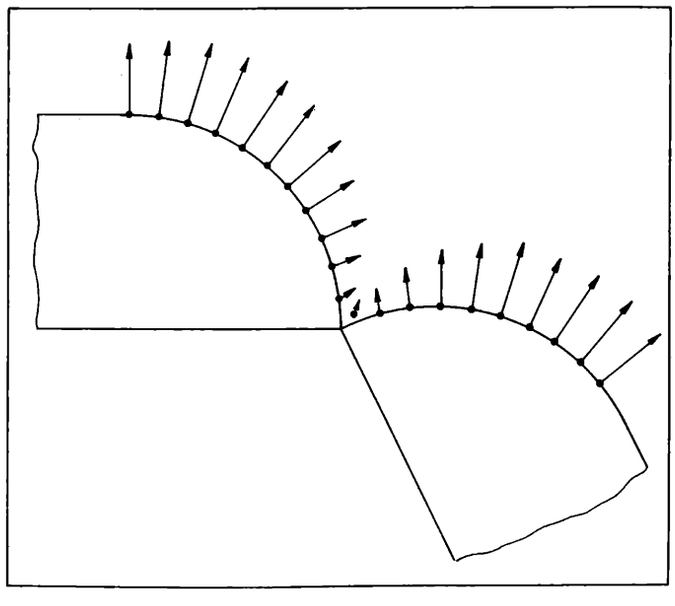
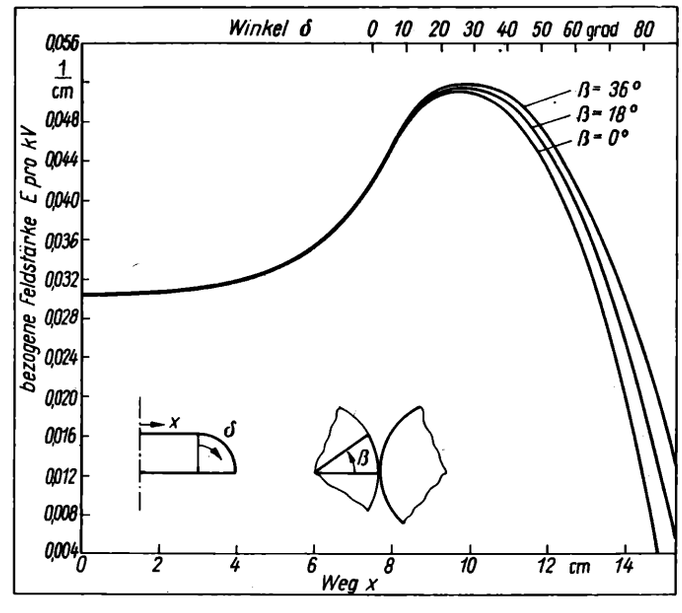


Bild 6. Feldstärke auf einem feldgleichen Segment



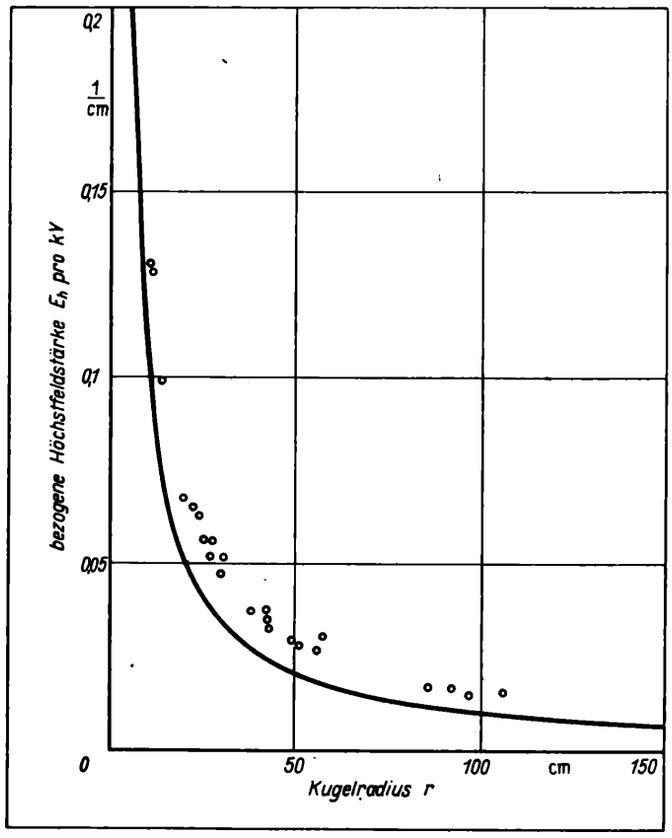


Bild 7. Bezogene Höchstfeldstärke für verschiedene Teller-Segmentelektroden (—— Hüllkugel)

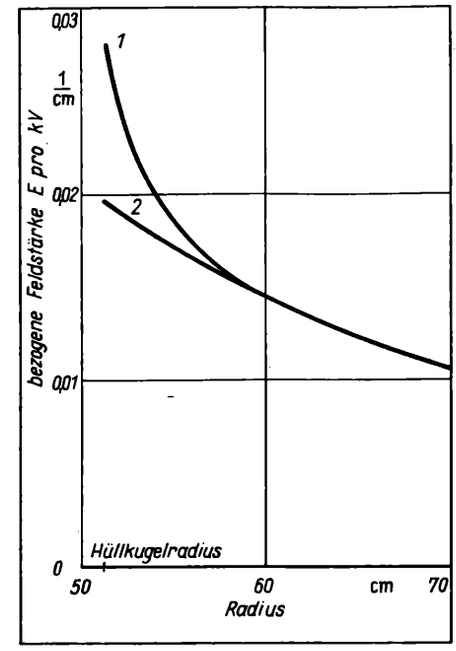


Bild 8. Reichweite der Segmentierung (1-Segmentkugel, 2-Hüllkugel)

$= 50$ cm, $h_T = 7$ cm, $a_T = 0$) berechnet und mit der entsprechenden Feldstärke der Hüllkugel verglichen (Bild 8). In einem Abstand von etwa 8 cm sind das Feld der Segmentelektrode und das Feld der Hüllkugel identisch. Die Reichweite der Segmentierung nimmt mit der Vergrößerung des Tellerabrundungsradius r_T zu und mit der Erhöhung der Tellerzahl, d. h. besserer Nachbildung der Kugel, ab.

4. Weitere Anwendungsmöglichkeiten

Auf der Grundlage des entwickelten Programms ist neben der Berechnung der Feldstärkeverteilung die Berechnung von Streamereinsetzspannung und Streamereinsetzfeldstärke nach der Townsend-Theorie möglich. Für einige Varianten wurden die Streamereinsetzspannung der Teller-Segmentkugel und der entsprechenden Hüllkugel berechnet. Danach beträgt die Streamereinsetzspannung der Teller-Segmentelektroden 75 % bis 85 % der Streamereinsetzspannung der entsprechenden Hüllkugeln, was gut mit dem von *Maucksch* [7] schon früher experimentell ermittelten Segmentierungsfaktor der Durchschlagspannung übereinstimmt.

Darüber hinaus sind folgende Anwendungsfälle möglich:

— Berechnung von Streamereinsetzfeldstärken bzw. Streamereinsetzspannungen nach der Schwaiger-Beziehung
— Berechnung der Ausdehnung des kritischen Feldgebietes zur Abschätzung der Leaderzündung [8]
— Anwendung des Vergrößerungsgesetzes der Statistik [9].

5. Abschätzung der Höchstfeldstärke beliebiger Teller-Segmentelektroden

Die Ergebnisse der bisher dargestellten Berechnungen lassen sich auch auf beliebige Teller-Segmentelektrodenanordnungen ausdehnen (z. B. Toroide, Zylinder, Hauben). Da die Segmentierung nur auf ein relativ eng begrenztes Gebiet vor der Segmentelektrode wirkt, der weitere Feldverlauf aber dem einer Kugel „frei im Raum", d. h. der unsegmentierten Anordnung, entspricht, kann man auf die für die Anordnung „frei im Raum" ermittelten Segmentierungsfaktoren der Höchstfeldstärke auch für reale Anordnungen zurückgreifen. Das ist sicher der Fall, wenn der Elektrodenabstand der abzuschätzenden Anordnung wesentlich größer als die Reichweite der Segmentierung von wenigen cm ist. Soll nun die Höchstfeldstärke einer Teller-Segmentelektrodenanordnung ermittelt werden, so behandelt man diese wie eine Elektrode mit geschlossener Oberfläche und hoher Oberflächengüte. Die für diese idealisierte Anordnung mit herkömmlichen Verfahren (Feldberechnung, Nomogramme o. ä.) ermittelten Höchstfeldstärken werden mit den entsprechenden Segmentierungsfaktoren der Höchstfeldstärke multipliziert:

$$E_{hT} = k_{sE_h} \cdot E_{hg} . \tag{4}$$

Zur Abschätzung der Streamereinsetzspannung von Teller-Segmentelektroden wird empfohlen, die für die entsprechende Elektrode mit geschlossener Oberfläche ermittelte Streamereinsetzspannung um 20 % zu reduzieren.

6. Zusammenfassung

In dem Beitrag wird eine Möglichkeit zur quantitativen Ermittlung des elektrischen Feldes ausgewählter Teller-Segmentelektroden beschrieben. Die rechentechnische Nachbildung dieser Teller-Segmentelektroden als Anordnung „frei im Raum" erfolgt mit den Punktladungen des Ladungsverfahrens unter Ausnutzung aller Symmetrien. Die durch die Segmentierung hervorgerufene Feldstärkeerhöhung (Segmentierungsfaktor der Höchstfeldstärke) liegt zwischen 1,4 und 1,6. Es wird vorgeschlagen, die ermittelten Segmentierungsfaktoren zur Abschätzung der Höchstfeldstärken beliebiger Teller-Segmentelektrodenanordnungen zu verwenden.

Literatur

[1] Impulsgenerator mit Polyconelektrode (engl.) CESI-News Nr. 1 b (26. 08. 1970)
[2] *Scherer, H. N.; Thoren, B.:* Die AEP-ASEA-Versuchsstation für Ultrahochspannung. ASEA-Zeitschrift 22 (1977) 6, S. 123—126
[3] *Hauschild, W.;* u. a.: Teller-Segmentelektroden für Hochspannungs-Prüfanlagen. ELEKTRIE, Berlin 37 (1983) 4, S. 189—192
[4] Technische Beschreibung und Anwenderhinweise. TuR — Elektrodenbaukasten; TuR — Firmenschrift
[5] *Singer, H.:* Das elektrische Feld von Polycon-Elektroden. 1. ISH, München 1972, S. 59—66
[6] *Steinbigler, H.:* Anfangsfeldstärken und Ausnutzungsfaktoren rotationssymmetrischer Elektrodenanordnungen in Luft. Dissertation A. TH München 1969
[7] *Maucksch, S.:* Beitrag zum Entladungsverhalten von segmentierten Elektroden und Drahtelektroden in Luft bei Beanspruchung mit 50-Hz-Wechsel- und positiver Schaltspannung. Dissertation A, TU Dresden 1981
[8] *Dietrich, M.:* Dimensionierung von großflächigen Elektroden für Hochspannungs-Prüfanlagen mit Abgabespannungen im Megavolt-Bereich. Dissertation A. TU Dresden 1983
[9] *Hauschild, W.; Mosch, W.:* Statistik für Elektrotechniker. Berlin: VEB Verlag Technik 1984

EA 5672

Zur Problematik von Teilentladungen an Teller-Segmentelektroden[1)]

W. Pflicke, KDT; E. Lemke, KDT; Dresden

Mitteilung der Sektion Elektrotechnik der Technischen Universität Dresden

Verwendete Formelzeichen

a_T	Teilelektrodenabstand
a_T^*	Grenzteilelektrodenabstand
D	Elektrodendurchmesser
D_T	Teilelektrodendurchmesser
h_T	Teilelektrodenhöhe
$i_{ph}(t)$	zeitlicher Verlauf des Fotostromes
n_I	Impulsanzahl
Q_I	Einzelimpulsladung (scheinbare Ladung)
Q_S	Summenimpulsladung
$q_{ph}(t)$	zeitlicher Verlauf der Fotoimpulsladung
R	Abrundungsradius der Tellerelektroden
s	Elektrodenabstand
s_T	Materialdicke der Tellerelektroden
t	Zeit
$\hat{U}$	Scheitelwert der Spannung
U_i	Teilentladungseinsetzspannung
U_S	Streamereinsetzspannung
$u(t)$	zeitlicher Verlauf der Spannung
$\varphi_e(t)$	zeitlicher Verlauf des Strahlungsflusses
50	Wahrscheinlichkeit in %
+	positive Polarität
—	negative Polarität

Hochspannungselektroden können vorteilhaft aus einzelnen Segmenten zu sogenannten Segmentelektroden zusammengesetzt werden. Vorzugsweise finden dabei tellerförmige Teilelektroden Verwendung. Eine optimale Gestaltung und Dimensionierung derartiger als Polycon-Elektroden [1] oder Teller-Segmentelektroden (TSE) bezeichneten Elektroden erfordern u. a. Kenntnisse zum Teilentladungsverhalten. Neben den bekannten Streamer- und Leaderentladungen, die im Bereich der Tellerabrundung (Bild 1 a) auftreten [2], können auch bereits vor dem Streamereinsatz stromschwache Teilentladungen (TE) an den scharfkantigen Tellerrändern (Bild 1 a) zünden. Während die Vermeidung von TE an den Abrundungen durch eine Optimierung sowohl der Krümmung der Teller als auch der Makrogeometrie der TSE mit Hilfe mathematischer Methoden zur Feldberechnung möglich ist, können TE an den scharfkantigen Rändern durch Umbördeln derselben nach innen (Bild 1 b) prinzipiell verhindert werden. Dies ist jedoch technisch sehr aufwendig und teuer sowie ökonomisch nicht vertretbar. Im Hinblick auf eine Beurteilung der Anwendbarkeit von Tellerelektroden mit scharfkantigem Rand wurde der Charakter der stromschwachen TE, deren Zünd- und Entwicklungsbedingungen sowie ihr Einfluß auf die Streamerzündung und den Durchschlag genauer untersucht. Die Experimente wurden sowohl an einem Einzelteller als Modellelektrode sowie an kompletten TSE durchgeführt [3].
Nachfolgend werden ausgewählte Ergebnisse vorgestellt und Schlußfolgerungen für die Gestaltung von TSE abgeleitet.

Dr. sc. techn. *Eberhard Lemke* ist Dozent am Wissenschaftsbereich Hochspannungstechnik der Sektion Elektrotechnik der TU Dresden, Dr.-Ing. *Wolfram Pflicke* ist wissenschaftlicher Assistent am o. g. Wissenschaftsbereich.
Die Autoren danken Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. *Wolfgang Mosch* und Herrn Dr. sc. techn. *Wolfgang Hauschild* für wertvolle Hinweise und Anregungen.

[1)] Die Arbeit wurde im Rahmen der Forschungskooperationsgemeinschaft ELTRA für den VEB Transformatoren- und Röntgenwerk „Hermann Matern" Dresden durchgeführt.

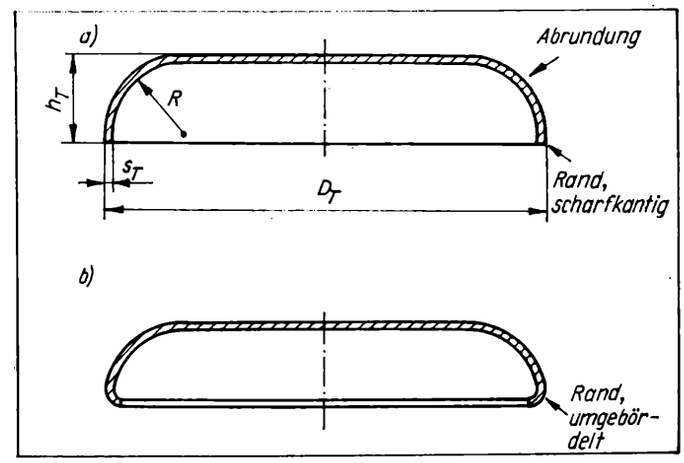


Bild 1. Geometrie tellerförmiger Teilelektroden
D_T Teilelektrodenabstand; h_T Teilelektrodenhöhe; s_T Materialdicke der Teller; R Abrundungsradius

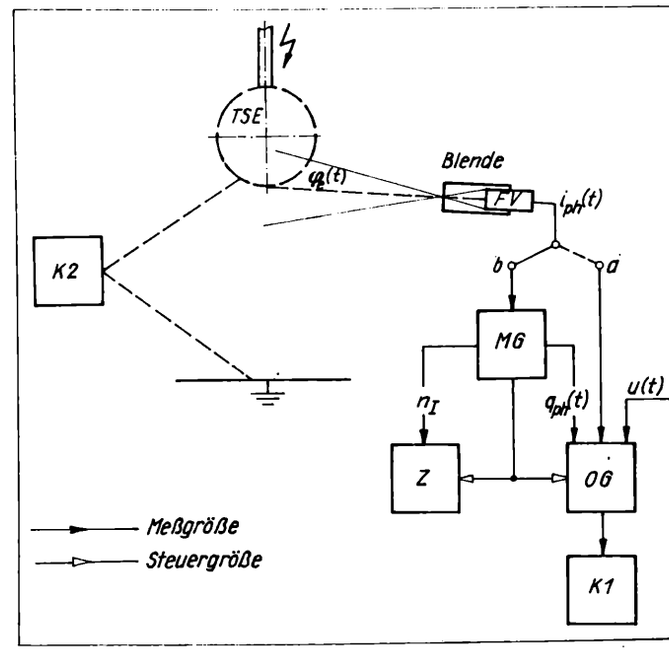


Bild 2. Elektro-optischer Teilentladungsmeßkreis
a) Bewertung der gesamten von den TE emittierten optischen Strahlung *b*) Bewertung des impulsförmigen Anteils
TSE Teller-Segmentelektrode; *OG* Oszillograf; *FV* Fotovervielfacher; *Z* Zähler; *MG* TE-Meßgerät; *K 1/K 2* Kamera

1. Versuchstechnik

Die Experimente erfolgten vorrangig bei 50-Hz-Wechselspannung an verschiedenen TSE mit kugelförmiger Makrogeometrie. Um den Einfluß der Elektrodengestaltung auf das TE-Verhalten beurteilen zu können, wurden die Geometrie und Anzahl sowie die Anordnung der Teller (Abstand und Stellung zueinander) variiert.
Zur Indikation sowie qualitativen und quantitativen Beschreibung der Entladungen wurde einerseits die standardisierte elektrische TE-Meßtechnik eingesetzt [4], die zur Ermittlung der Einzelimpuls- (Q_I) und Summenimpulsladung (Q_S) diente. Andererseits erfolgte eine Bewertung von Lichterscheinungen der Entladungen durch eine elektro-optische Meßeinrichtung (Bild 2). Der von den TE emittierte Strahlungsfluß $\varphi_e(t)$ wurde mittels empfindlicher Fotovervielfacher erfaßt und der Fotostrom $i_{ph}(t)$ oszillografisch ausgewertet. Für den impulsförmigen Anteil des Strahlungsflusses erfolgte eine Ladungsbewertung der fotoelektrischen Signale mit Hilfe eines TE-Meßgerätes (MTE 3). Durch den Einsatz der elektro-optischen Meßeinrichtung konnten in vorteilhafter Weise die Schwierigkeiten umgangen werden, die bei konventioneller elektrischer TE-Messung im Megavolt-Bereich auftreten, wie z. B. die Realisierung der TE-Freiheit von Koppelkondensator und Spannungszuführung. Außerdem war mittels Fotovervielfacher auch der Nachweis sogenannter impulsloser TE-Vorgänge möglich.

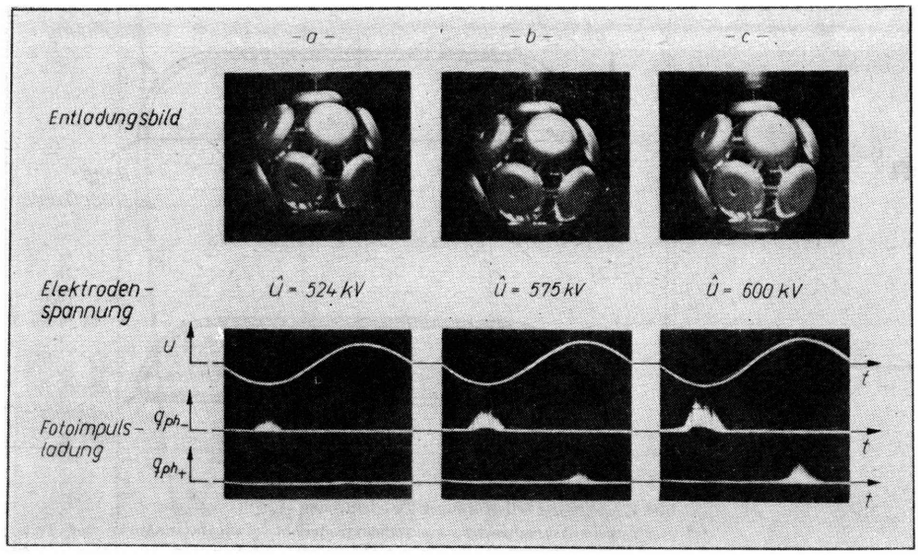


Bild 3
Entladungen vor dem Streamereinsatz an einer TSE ($12 \times T\ 250$; $s = 1$ m; 50-Hz)

2. Entladungsverhalten

2.1. Entladungszündung vor dem Streamereinsatz

Mit Vergrößerung des Abstandes benachbarter Tellerelektroden erfolgt eine Erhöhung der Feldstärke vor den scharfkantigen Tellerrändern. Damit wird die Zündung von TE besonders an den Stellen begünstigt, an denen die Tellerelektroden den größten Abstand zueinander haben. Bei den untersuchten TSE sind dies die Drei-, Vier- oder Fünfeckköffnungen, abhängig vom Aufbau der Elektrode (Bild 3).

Im Bereich der Einsetzspannung sind TE sowohl in der negativen als auch in der positiven Halbperiode der Wechselspannung nachweisbar. Bei der negativen Entladung handelt es sich um die bekannte impulsförmige Trichelentladung [5] bis [7] (Bilder 3a und 4). Wenig oberhalb der TE-Einsetzspannung liegt die scheinbare Ladung der Impulse Q_I zwischen einigen 10 und wenigen 100 pC. Sie hängt ab von der Elektrodenkonfiguration und damit auch von der TE-Einsetzspannung selbst. In der positiven Halbperiode konnte nur die impulslose, positive Glimmentladung [6] [8] [9] beobachtet werden (Bilder 3a und 4).

Die gemessenen Werte der TE-Einsetzspannungen können durch Normalverteilungen approximiert werden. Unabhängig von der Elektrodengeometrie und dem Elektrodenabstand weisen sie eine sehr geringe Streuung auf, der Variationskoeffizient ist kleiner als 1,5 %. Daraus läßt sich u. a. ableiten, daß bei TSE, im Gegensatz zu großflächigen, störstellenbehafteten Elektroden [10], lawinenwirksame Anfangselektronen zur Zündung von TE offensichtlich stets in ausreichendem Maße zur Verfügung stehen, bedingt durch die Vielzahl von möglichen Zündorten an den scharfkantigen Tellerrändern.

Die sich aus dem Aufbau der TSE ergebende Telleranordnung und die Tellergeometrie üben einen deutlichen Einfluß auf die Höhe der Einsetzspannung von Trichel- und Glimmentladung aus. Eine Vergrößerung des Teilelektrodenabstandes a_T zum Beispiel kann zu einer erheblichen Reduzierung der TE-Einsetzspannung $\hat{U}_i$ der Elektrode führen (Bild 5). Die Absenkung von $\hat{U}_i$ ist bei TSE mit unregelmäßigem Stützgerüst aufgrund der teilweise großen Tellerabstände besonders ausgeprägt (Bild 5). Auch eine Vergrößerung der Neigung der Tellerelektroden zueinander (größerer Telleranstellwinkel) sowie eine Verringerung der Materialdicke s_T der Teilelektroden hat eine Reduzierung der TE-Einsetzspannung zur Folge.

Bild 4. Übersicht der Teilentladungen an einer TSE bei 50-Hz-Wechselspannung (* impulsförmige TE; auch Leaderentladung führt zum Durchschlag.)

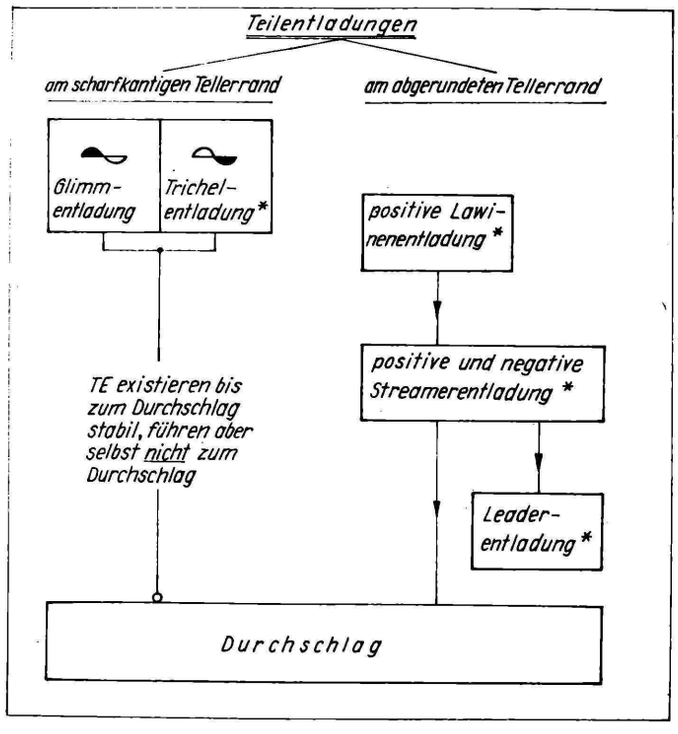
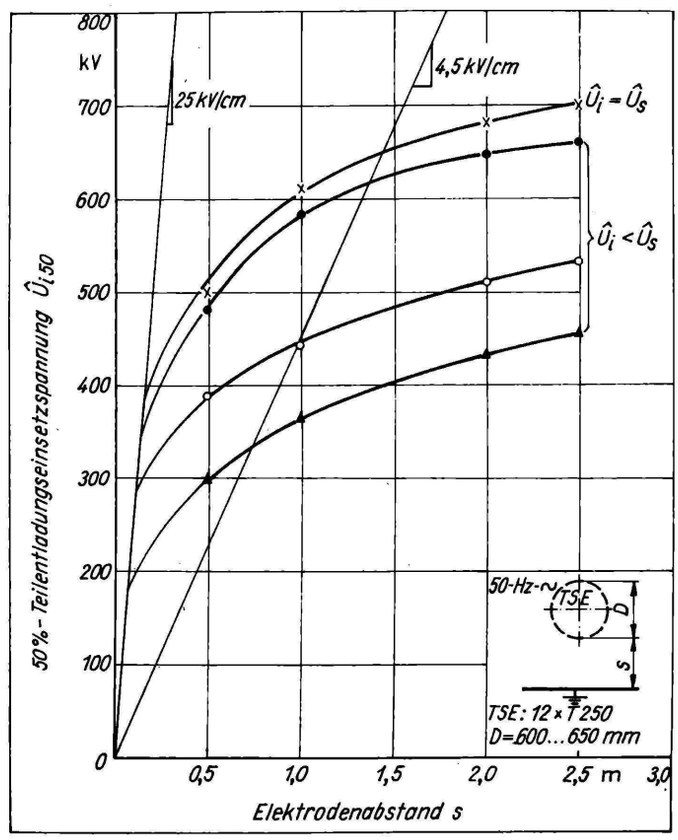


Bild 5. Einfluß des Elektroden- und Teilelektrodenabstandes auf die 50 %-TE-Einsetzspannung von TSE
(Teilelektrodenabstand a_T: × 35 mm • 45 mm • 55 mm △ 15 mm —
TSE mit unregelmäßigem Stützgerüst; größter Tellerabstand: 150 mm)



Ursache dafür ist die verminderte Feldschattenwirkung benachbarter Tellerelektroden auf die scharfkantigen Tellerränder bzw. die zunehmende Inhomogenität der Elektrodenanordnung.
Für regelmäßige, kurgelförmige TSE ist ein maximaler Teilelektrodenabstand, der sogenannte Grenzteilelektrodenabstand a_T* angebbar, unterhalb dem keine TE an den scharfkantigen Tellerrändern auftreten. Dieser experimentell ermittelte Grenzwert kann vorteilhaft zur Beurteilung des TE-Verhaltens von TSE genutzt werden.

2.2. Räumlich-zeitliche Entladungsentwicklung

Die räumlich-zeitliche Entwicklung der TE an den scharfkantigen Tellerrändern wird außer von der Höhe der Elektrodenspannung sowohl von der Elektrodenkonfiguration als auch von der Tellergeometrie bestimmt. Bei Spannungssteigerung nimmt die Intensität der TE zu und ihre räumliche Ausdehnung wird größer (Bilder 3b und c). Deutlich sichtbar ist der sich zwischen den hell leuchtenden Entladungspunkten ausbildende „Leuchtschlauch" des positiven Glimmens. Die scheinbare Ladung der Trichelimpulse beträgt einige 100 pC. Die Trichel- und Glimmentladung sind bis zum Durchschlag der Elektrodenanordnung nachweisbar, ohne diesen jedoch direkt zu verursachen. Auch ein Instabilwerden der TE mit nachfolgender Streamerzündung am scharfkantigen Tellerrand ist bei den untersuchten TSE selbst bei längeren Beanspruchungszeiten nicht registriert worden.
Neben den TE an den scharfkantigen Rändern der TSE treten bei höheren Elektrodenspannungen (noch vor dem Streamereinsatz — siehe Abschn. 2.3.) positive, impulsförmige Lawinenentladungen an den Tellerabrundungen, also außerhalb der Tellerränder auf (Bilder 3b, c und 4). Ursache dieser TE-Erscheinung ist eine von den Trichelentladungen herrührende negative Raumladung, welche die Feldstärke unmittelbar vor der Elektrode erhöht. Bei einem entsprechend starken Grundfeld (d.h. bei höheren Spannungen) führt diese Feldstärkeerhöhung zur Zündung der Lawinenentladungen, die jedoch nicht die für eine Streamerzündung notwendige kritische Verstärkung erreichen. Für diese Annahme spricht u.a., daß die Entladungen an den Stellen der Tellerabrundung zünden, in deren unmittelbarer Nähe Trichelentladungen auftreten (Bilder 3b und c). Auch wird die Einsetzspannung und Intensität der Lawinenentladungen im wesentlichen von der Intensität und räumlichen Ausdehnung der Trichelentladung bestimmt. Die Einzelimpulsladung der Lawinenentladung wurde zu 10···20 pC ermittelt.

2.3. Einfluß auf Streamerzündung und Durchschlag

Wird die Elektrodenspannung bis zur Streamereinsetzspannung $\hat{U}_S$ gesteigert, zündet die erste Entladung stets im Scheitel der Wechselspannung. Hinsichtlich der Momentanwerte der Einsetzspannungen von positiven und negativen Streamerentladungen ist kein signifikanter Unterschied festzustellen. Unabhängig von der Elektrodengeometrie und davon, ob zuvor TE auftreten, zünden die Streamer nicht am scharfkantigen Rand der Tellerelektroden sondern an deren Abrundung. Von dort aus führen sie unmittelbar zum Durchschlag, oder sie existieren zunächst stabil, und es kommt bei höheren Elektrodenspannungen zum Durchschlag [2] [3].
Die empirische Verteilung der Werte der Streamereinsetzspannungen kann durch eine Normalverteilung mit sehr kleiner Streuung (Variationskoeffizient kleiner 1%) approximiert werden. TE, die vor dem Streamereinsatz an den TSE auftreten, haben auf die Streuung der Streamereinsetzspannung keinen und auf deren Höhe nur einen relativ geringen Einfluß. Gegenüber äquivalenten TE-freien TSE werden sogar etwas höhere Einsetzspannungen erzielt. Diese Erscheinung ist wiederum auf Raumladungen zurückzuführen, die von den TE am scharfkantigen Rand der Tellerelektroden sowie von den Lawinenentladungen an deren Abrundung herrühren, und die das elektrische Feld unmittelbar vor der Elektrode verändern. In welchem Maße die Streamerzündung dadurch beeinflußt wird, hängt in erster Linie vom Verhältnis der Einsetzspannungen $\hat{U}_I/\hat{U}_S$ und damit von der Intensität und räumlichen Ausdehnung vor allem der Trichelentladung ab.

3. Schlußfolgerungen für die Gestaltung und den Einsatz von TSE

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, daß bei der Gestaltung der Teller von TSE auf eine zusätzliche Abrundung der Ränder z.B. durch Umbördeln verzichtet werden kann. Das ist äußerst vorteilhaft, da die Tellerelektroden dann besonders rationell und ökonomisch hergestellt werden können. Hinsichtlich der Verwendung sind zwei wesentliche Fälle zu unterscheiden:

1. Einsatz in Hochspannungsprüfkreisen, die nicht für eine TE-Messung vorgesehen sind

In diesem Fall sind TE an den scharfkantigen Tellerrändern zulässig, wenn gewährleistet ist, daß kein Umschlag in die Streamorentladung erfolgt. Von grundlegender Bedeutung ist, daß unter dieser Voraussetzung die TE an den Tellerrändern keine Absenkung der Streamereinsetz- und Durchschlagspannung gegenüber äquivalenten TE-freien TSE bewirken.

2. Einsatz in Hochspannungsprüfkreisen mit TE-Messung

Da die Intensität der Trichelimpulse an den scharfkantigen Tellerrändern einige 100 pC übersteigen kann, muß gewährleistet sein, daß bis zur TE-Prüfspannung keine Trichelentladungen auftreten. Zur Vermeidung von stabilen TE an den scharfkantigen Tellerrändern muß der Teilelektrodenabstand a_T kleiner als der_o.g. Grenzteilelektrodenabstand a_T* sein. Bei der Realisierung von Elektroden mit größeren Abmessungen ist in Zweifelsfällen den Anordnungen mit einer größeren Anzahl von Tellern der Vorrang zu geben, da aufgrund des dann kleineren Telleranstellwinkels die Auswirkungen von Tellerstellungsfehlern (z.B. Schiefstellung einzelner Teller) geringer sind. Des weiteren ist aus entladungsphysikalischen Gründen sowie aus Gründen einer ausreichenden mechanischen Eigenstabilität der Tellerelektroden eine bestimmte Materialdicke erforderlich. Für Teller mit einem Durchmesser von 0,25 m sollte die Dicke 1 mm nicht unterschreiten, während für einen Durchmesser von 0,5 m ein Wert von mindestens 1,50 mm notwendig ist.
Die o.g. Erkenntnisse und Schlußfolgerungen wurden bei der Entwicklung und dem Bau des vom VEB Transformatoren- und Röntgenwerk „Hermann Matern" Dresden angebotenen TuR-Elektrodenbaukasten [11] [12] genutzt. Beim praktischen Einsatz bestätigte sich die Richtigkeit der Überlegungen.
Aus den Untersuchungen läßt sich weiter ableiten, daß bei einer Kontrolle der TSE auf TE-Freiheit speziell die scharfkantigen Tellerränder zu überprüfen sind. Eine Ermittlung der TE-Einsetzspannung und des TE-Ortes sowie eine Charakterisierung der TE hinsichtlich Art und Intensität ist in einfacher Weise durch elektrooptische Messungen mittels Fotovervielfacher möglich, wobei die interessierende TE-Kenngröße „scheinbare Impulsladung" mit hinreichender Genauigkeit ermittelt werden kann.

Literatur

[1] CESI-Impulse generator with polycon electrode. CESI-News Nr. 16, 26. 8. 1970
[2] *Mauckscb, S.:* Beitrag zum Entladungsverhalten von segmentierten und Drahtelektroden in Luft bei Beanspruchung mit 50-Hz-Wechsel- und positiver Schaltspannung. Dissertation TU Dresden 1981
[3] *Pflicke, W.:* Zur Zündung und Charakteristik von Teilentladungen an Teller-Segmentelektroden Dissertation TU Dresden 1986
[4] Partial discharge measurements. (Teilentladungsmessung) IEC-Standard Publication 270
[5] *Trichel, G. W.:* The mechanism of negative point to plane corona near onset. Phys. Rev. 54 (1938), pp. 1078—1084
[6] *Giao, T. N.; Jordan, J. S.:* Modes of corona discharges in air. IEEE Trans PAS 87 (1968) 3, pp. 1205—1215
[7] *Zentner, R.:* Der räumlich-zeitliche Aufbau der negativen impulsförmigen Koronaentladung. Dissertation Universität Karlsruhe 1969
[8] *Loeb, L. B.:* Electrical coronas- Their basic physical mechanism. University of California Press, Berkeley/Los Angeles 1965
[9] *Waters, R. T.; Stark, W. B.:* Characteristics of the stabilizied glow discharge in air. J. Phys. D.; Appl. Phys. 8 (1975)
[10] *Engelmann, E.:* Beitrag zum Entladungsverhalten großflächiger, störstellenbehafteter Elektroden in Luft bei positiver Schaltspannung. Dissertation TU Dresden 1981
[11] *Hauschild, W.; Dietrich, M.; Schufft, W.; Schwab, H.:* Teller-Segmentelektroden für Hochspannungsprüfanlagen. ELEKTRIE, Berlin 37 (1983) 4, S. 189—192
[12] Technische Beschreibung und Anwenderhinweise „TuR Elektrodenbaukasten" für Teller-Segment- und Zylinderelektroden, Dresden 1983.

EA 5670

Messungen der Durchschlagspannung an einer 2,7-m-Teller-Segmentkugel gegen Ebene unter Freiluftbedingungen

W. Schufft, KDT; J. Beyer, KDT; Dresden

Mitteilung aus dem VEB Transformatoren- und Röntgenwerk „Hermann Matern" Dresden und der Sektion Elektrotechnik der Technischen Universität Dresden

1. Problemstellung

Großflächige Elektroden für Hochspannungsprüfanlagen haben technologisch bedingte Störstellen. Unter Freiluftbedingungen erfahren diese Störstellen sowie die gesamte Oberfläche durch die Korrosion eine Veränderung, und es kommen neue, z. B. durch Ablagerung unterschiedlichster Art, hinzu. Gleichzeitig können beim Betrieb der Hochspannungsprüfanlagen die unterschiedlichsten Witterungseinflüsse (Druck, Temperatur, Luftfeuchte, Regen, Schnee, Tau, Reif, Sonneneinstrahlung, Wind) auftreten. Die Witterungseinflüsse sind für einen kurzen Zeitraum, z. B. eine Prüfzeit von 1 Stunde zufällig, korrelieren aber mit den Tages- und Jahreszeiten. Hinzu kommen frei bewegliche Partikel (Insekten, Samen, Blätter, Flugstaub), die wiederum für bestimmte Tages- bzw. Jahreszeiten typisch sind. Von großem Interesse ist deshalb die Frage, um wieviel die Abgabespannung einer Hochspannungsprüfanlage gegenüber der für Normalbedingungen („Schönwetter") angegebenen Nennspannung bei „Schlechtwetter" reduziert werden muß, bzw. welches Dimensionierungskriterium bei „Schlechtwetter" anzuwenden ist.

2. Versuchsanordnung, -durchführung und -auswertung

Als Versuchselektrode dient eine Teller-Segmentkugel von 2,7 m Durchmesser (Bild 1). Diese ist mit 72 Elektrodentellern (Tellerdurchmesser 50 cm, Tellerhöhe und Tellerabrundungsradius 7 cm) bestückt [1]. Der Abstand zur geerdeten Plattenelektrode (4 m × 4 m) beträgt bei allen Meßreihen 1,5 m. Es handelt sich bezüglich der Hüllkugel der Segmentelektrode um eine schwach inhomogene Elektrodenanordnung. Der Ausnutzungsfaktor nach *Schwaiger* beträgt 0,53.

Die Prüfung mit 50-Hz-Wechselspannung[1]) wurde als Spannungssteigerungsversuch (mittlere Spannungssteigerungsgeschwindigkeit 15 kV/s) durchgeführt. Die Zeit zwischen zwei Durchschlägen war stets größer als 90 s. Je Meßreihe wurden etwa 50 Realisierungen der Durchschlagspannung ermittelt. Die Kontrolle der Unabhängigkeit erfolgte anhand der Urlisten. Zur weiteren Auswertung wurden die empirischen Summenhäufigkeitsfunktionen auf der Grundlage der Normalverteilung erstellt.

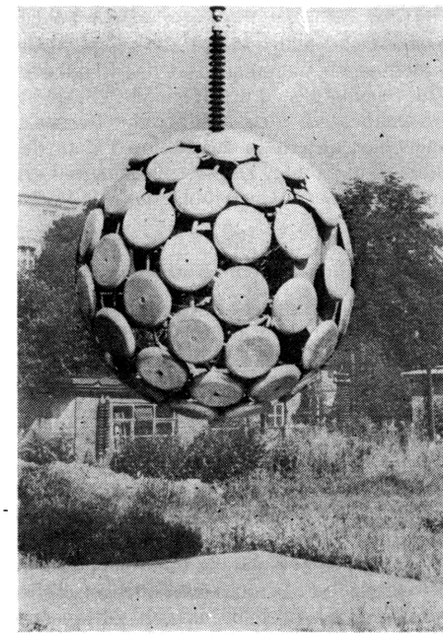
Die Schaltspannungsprüfung[1]) erfolgte mit dem Standardimpuls 250/2500 negativer Polarität. Es kam der erweiterte Spannungssteigerungsversuch mit fünf Beanspruchungen je Stufe zur Anwendung, wie er zur Ermittlung der technisch interessierenden kleinen Quantile der Durchschlagspannung vorteilhaft ist [2]. Die Stufenhöhe betrug etwa 35 kV.

Dipl.-Ing. *Wolfgang Schufft* ist Entwicklungsingenieur im Anlagenlabor des VEB Transformatoren- und Röntgenwerk „Hermann Matern" Dresden, Ing. *Jochen Beyer* ist Ingenieur für Lehre und Forschung im Methodisch-diagnostischen Zentrum Hochspannungstechnik der Technischen Universität Dresden.

Den Herren Dr. sc. techn. *W. Hauschild* und Dr. Ing. *E. Engelmann* sei für Diskussionen zu dieser Arbeit gedankt.

[1]) Als Spannungsquellen standen eine Wechselspannungsprüfanlage 1200 kV, 1,5 A (Hersteller TuR Dresden) und eine Impulsspannungsprüfanlage 2500 kV, 100 kJ (Hersteller TuR Dresden) zur Verfügung. Die Spannungsmessung erfolgte mit den zu den Prüfanlagen gehörenden kapazitiven Spannungsteilern und der Universalscheitelspannungs-Meßeinrichtung MU 9 (Hersteller TuR Dresden).

Bild 1. Versuchsanordnung



Von fünf Beanspruchungen je Stufe wird auf eine Beanspruchung je Stufe zurückgerechnet:

$$p_1 = 1 - (1 - p_5)^{1/5} .$$

Die so ermittelten Werte der Durchschlagschaltspannung werden wie die Durchschlagwechselspannung als empirische Summenhäufigkeitsfunktion dargestellt. Die statistische Auswertung erfollgte einschließlich der grafischen Darstellung mit Hilfe eines Bürocomputers A 1520 [3].

Die gemessenen Durchschlagspannungswerte wurden nur bezüglich der Luftdichte auf atmosphärische Normalbedingungen korrigiert. Wie später noch diskutiert wird, besteht die Stichprobe aus Teilkollektiven — von Vorentladung ausgehende Durchschläge und Durchschläge ohne Vorentladung. Erstgenannte wären zusätzlich bezüglich der Luftfeuchte zu korrigieren [4] [5]. Da eine exakte Trennung beider Teilkollektive nicht möglich ist, wurde auf die Luftfeuchtekorrektur verzichtet.

3. Meßergebnisse

Über einen Zeitraum von neun Monaten wurden 25 Meßreihen der Durchschlagwechselspannung ermittelt. Bild 2 zeigt fünf repräsentative Meßreihen, dargestellt im Wahrscheinlichkeitsnetz der Normalverteilung. Die Meßreihen sind entweder normalverteilt (Meßreihe 1, 2) oder sie bilden eine additive Mischverteilung [8] aus normalverteilten Komponenten (Meßreihe 3, 4, 5). Sehr niedrige Werte der Durchschlagspannung treten auf, wenn Wassertropfen an den Tellern vorhanden sind. Der mittlere Spannungsbedarf der zu den Meßreihen 1 und 2 gehörenden Entladung beträgt etwa 4,5 kV/cm, der Variationskoeffizient der Meßreihen etwa 3 %. Die Elektrodenanordnung zeigt also das Verhalten einer Spitze-Platte-Anordnung.

Meßreihe 3 weist sowohl eine Komponente der Spitze-Platte-Anordnung als auch eine Komponente mit großer Streuung auf. Die *Spitze-Platte-Komponente* entsteht dadurch, daß zum Zeitpunkt, da die tiefstmögliche Durchschlagspannung während der Spannungssteigerung erreicht ist, auch zufällig ein Wassertropfen (schwacher Regen) entladungswirksam wird.

Die Meßreihen 3, 4 und 5 haben eine Komponente mit einer großen Streuung (Variationskoeffizient 20 %—30 %), die als *Störstellen-Komponente* [6] bezeichnet wird. Diese Störstellen-Komponente wird durch Entladungszündung an technologisch bedingten sowie durch Korrosion und Ablagerung entstandenen Störstellen bestimmt. Dazu kommt die Wirkung freibeweglicher, nichtleitender Partikel (Insekten, Staub), die wegen ihrer niedrigen relativen Dielektrizitätszahl im Elektrodenzwischenraum weniger entladungswirksam sind als Wassertropfen.

Die unterschiedliche Lage der Störstellen-Komponente ist bei gleichbleibender Oberflächenbeschaffenheit der Elektrode abhängig:

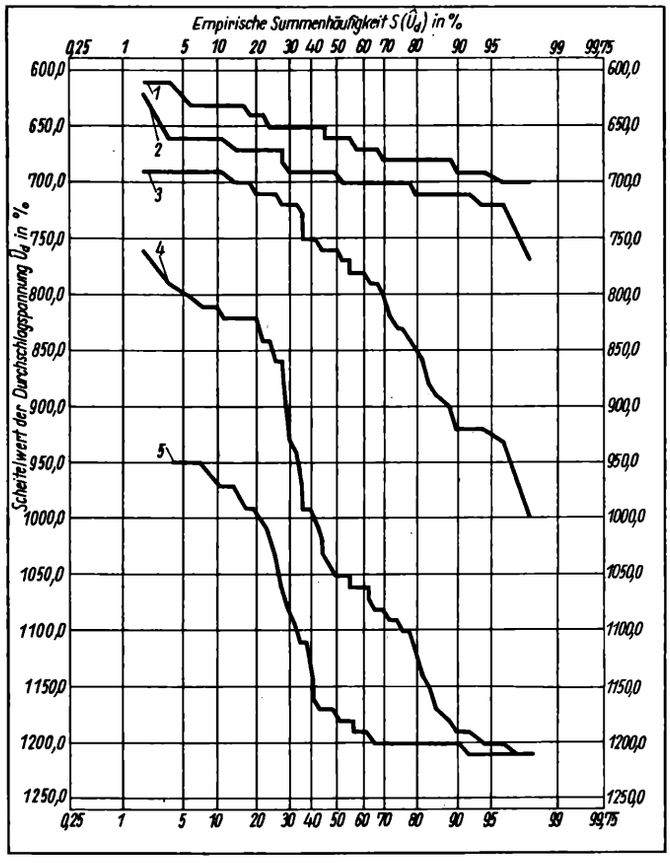
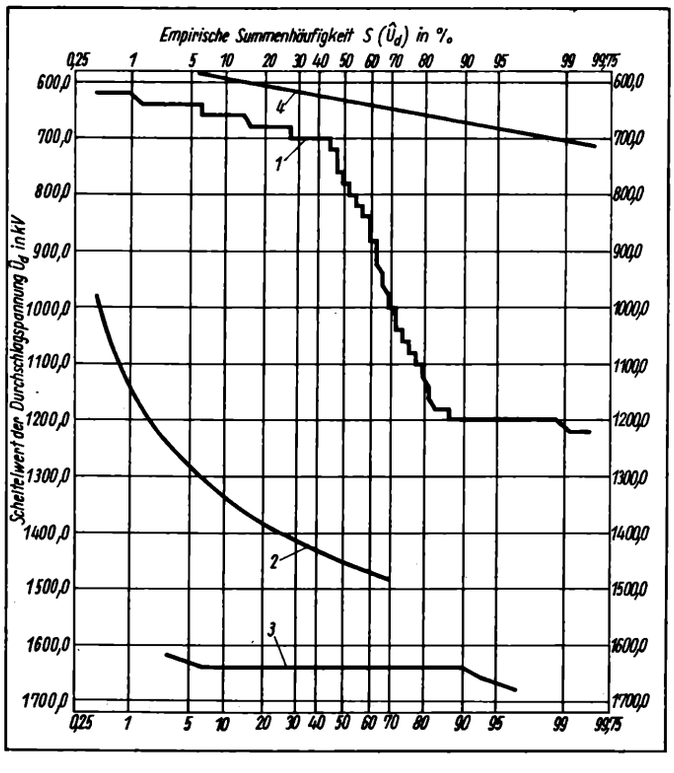


Bild 2. Meßreihen der Durchschlagwechselspannung

1 30. 4. 85; 98,6 KPa: Regen, böiger Wind/5 °C
2 10. 7. 85; 100,4 KPa: Elektrode tropft ständig, mäßiger Wind/19 °C
3 15. 7. 85; 100,4 KPa: schwacher Regen, geringe Tropfenbildung/22 °C
4 8. 7. 85; 100,6 KPa: vereinzelte Regentropfen, mäßiger Wind/19 °C
5 12. 7. 85; 100,4 KPa: trocken, windstill/23 °C

Bild 3. Meßreihen der Durchschlagspannung

1 resultierende Summenhäufigkeit für Wechselspannung
2 resultierende Summenhäufigkeit für Schaltspannung
3 Durchschlagwechselspannung im Neuzustand und Innenraum
4 Durchschlagspannung der Spitze-Platte-Anordnung



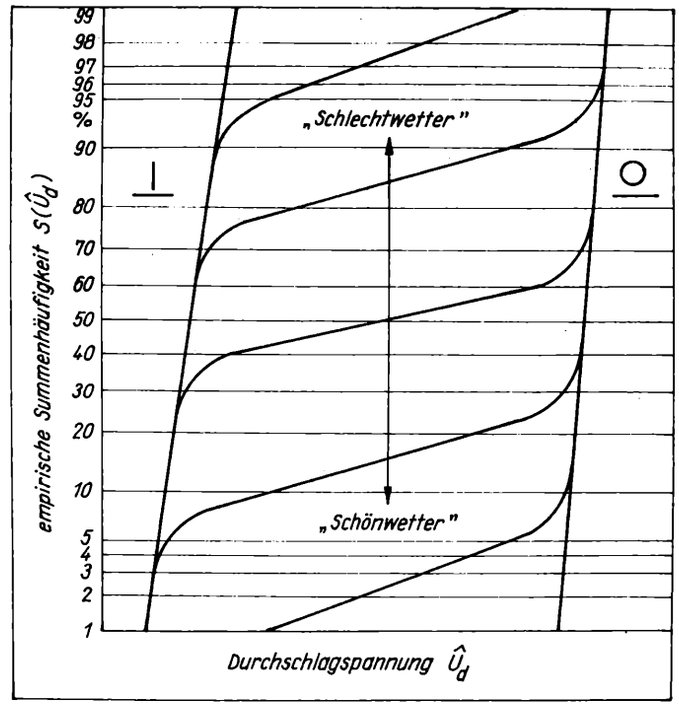


Bild 4. Prinzipieller Einfluß der Umgebungsbedingungen auf das Entladungsverhalten großflächiger Hochspannungselektroden

— vom Vorhandensein von Wassertropfen (Spitze-Platte-Komponente)
— vom Auftreten nichtleitender Partikel, insbesondere Insekten im Elektrodenzwischenraum [7].

Abhängig daon, wie ausgeprägt die Störstellen-Komponente ist, kann im oberen Bereich der empirischen Summenhäufigkeitfunktion eine Komponente mit geringer Streuung (Variationskoeffizient 1 %—3 %) vorhanden sein. Diese *Grundfeld-Komponente* [6] wird durch Entladungszündung an der zwar rauhen, aber sonst ungestörten Elektrodenoberfläche, die unmittelbar zum Durchschlag führen, bestimmt.

Werden nun alle Realisierungen der Durchschlagwechselspannung als eine Grundgesamtheit angesehen, dann ergibt sich eine resultierende empirische Summenhäufigkeit (Kurve *1*, Bild 3). Alle drei Komponenten sind deutlich zu erkennen. Die resultierende Verteilung ist eine additive Mischverteilung [8]. Das Gewicht der Komponenten hängt von den zufällig herrschenden Umgebungsbedingungen ab. So würde eine größere Anzahl von „Schönwetter"-Tagen eine annähernd parallele Verschiebung der Störstellen-Komponente zu kleineren Wahrscheinlichkeiten bewirken. Der prinzipielle Einfluß des Wetters ist im Bild 4 dargestellt. Typisches „Schönwetter" ist also trockene partikelfreie Luft, typisches „Schlechtwetter" ist durch Regentropfen oder durch viele Partikel in der Luft gekennzeichnet.

Werden nun alle an 25 verschiedenen Meßtagen nach der beschriebenen Prozedur ermittelten Realisierung der Durchschlagschaltspannung ebenfalls als eine Grundgesamtheit betrachtet, so ergibt sich die im Bild 3 dargestellte geschlossene Kurve *2*:

Die Spitze-Platte-Komponente fehlt. Die Störstellen-Komponente bestimmt den Verlauf und geht in die Grundfeld-Komponente über. Es ist anzunehmen, daß für kleine Wahrscheinlichkeiten der Durchschlagspannung die Kurve *2* in die Spitze-Platte-Komponente der Kurve *1* übergeht.

Die Kurve *3* ist die empirische Summenhäufigkeit für dieselbe Elektrode im fabrikneuen Zustand im Innenraum nach abgeschlossener Konditionierung [6]. Sie besitzt nur die Grundfeld-Komponente. Die Verschiebung der Grundfeld-Komponente der resultierenden Durchschlagwechselspannung (Kurve *1*) gegenüber der Grundfeld-Komponente bei fabrikneuer Elektrode (Kurve *3*) ist mit der Korrosion der Oberfläche zu erklären. Die relativ vielen, durch Korrosion entstandenen Störstellen werden bei der Wechselspannungsbeanspruchung immer wirksam, bei der Schaltspannungsbeanspruchung aber nur gelegentlich, so daß die resultierende empirische Summenhäufigkeit der Schaltspannung (Kurve *2*) bei höheren Spannungswerten liegt.

Zum Vergleich ist im Bild 3 die Kennlinie für die Spitze-Platte-Anordnung (Kurve *4*) eingetragen.

4. Schlußfolgerung und Zusammenfassung

Werden großflächige Hochspannungselektroden im Freien eingesetzt, so kommt es zu einer beträchtlichen Verringerung der Durchschlagspannung (bzw. Streamereinsetzspannung). Gründe dafür sind die Verschlechterung der Oberflächenbeschaffenheit durch Ablagerung und Korrosion, freibeweglicher Partikel (Insekten, Samen, Staub) und widrige klimatische Bedingungen, wobei Wassertropfen den größten Einfluß haben. Die empirischen Summenhäufigkeitsfunktionen sind additive Mischverteilungen und besitzen wiederum annähernd normalverteilte Komponenten. Die Spitze-Platte-Komponente begrenzt die empirische Summenhäufigkeitsfunktion nach unten. Sie gibt die minimal mögliche Durchschlagspannung (bzw. Streamereinsetzspannung) an und tritt mit dem Vorhandensein von Wassertropfen im Elektrodenzwischenraum auf. Die durch eine große Streuung gekennzeichnete Störstellen-Komponente ist auf die Wirkung relativ weniger, exponierter Störstellen auf der Elektrode und auf nichtleitende Partikel im Elektrodenzwischenraum zurückzuführen. Die Grundfeld-Komponente begrenzt die empirische Summenhäufigkeit nach oben und spiegelt durch ihre Lage die Oberflächenbeschaffenheit wider.

Bei der Dimensionierung von Hochspannungselektroden für den Freilufteinsatz bzw. bei deren Betrieb sind nicht nur die Art der Spannungsbeanspruchung und die geometrischen Randbedingungen zu berücksichtigen, sondern auch die am Einsatzort auftretenden Umgebungsbedingungen. Die an Teller-Segmentelektroden gewonnenen Erkenntnisse sind qualitativ auf Elektroden mit geschlossener Oberfläche übertragbar.

Literatur

[1] *Hauschild, W.;* u.a.: Teller-Segmentelektroden für Hochspannungsprüfanlagen. ELEKTRIE, Berlin 37 (1983) 5, S.189—192

[2] *Hauschild, W.; Mosch, W.:* Statistik für Elektrotechniker. Berlin: VEB Verlag Technik 1984

[3] *Hauschild, W.; Wolf, J.:* Statistische Auswertung mit dem Bürocomputer: Ermittlung und Darstellung empirischer Normalverteilungen. ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 6, S.231—236

[4] IEC-draft-high voltage techniques revision of publication 60-1 and 60-2. 42 (secretary) 41. August 1984

[5] *Zimmer, H. H.; Schwab, A. J.:* Influence of humidity on AC and DC corona from electrodes with technical dimensions. Eighth International Conference of Gas Discharges and their Applications, Oxford Sept. 85

[6] *Dietrich, M.:* Beitrag zur Dimensionierung großflächiger Elektroden für Hochspannungsprüfanlagen. Dissertation TU Dresden 1983

[7] *Peier, D.-W.; Groschopp, H.:* Wechselspannungsmessungen mit Kugelfunkenstrecken auf Freiluftversuchsfeldern. PTB Mitteilung 87, Ausgabe 5/77

[8] *Engelmann, E.:* Beitrag zum Entladungsverhalten großflächiger störstellenbehafteter Elektroden in Luft bei positiver Schaltspannung. Dissertation TU Dresden 1980

EA 5671

Haben Sie unseren Lesern schon Ihre Erzeugnisse vorgestellt?

Gezielte Anzeigenwerbung in unserer Fachzeitschrift bedeutet:

Hoher Werbeeffekt bei niedrigen Kosten

denn

- die Fachzeitschrift ELEKTRIE wird von Fachleuten in mehr als 25 Ländern der Erde gelesen
- erfahrungsgemäß ist die Werbung dann besonders wirksam, wenn im gleichen Heft ihre Anzeige zusammen mit einem thematisch passenden Fachartikel erscheint, der auch die Erzeugnisse Ihres Betriebes vorstellt.

Ob ganzseitige farbige Anzeigen auf den Umschlagseiten oder Kleinanzeigen im Innenteil. Dieses Angebot sollten Sie nutzen! Noch in diesem Jahr. Wir beraten Sie gern!

Bitte rufen Sie uns an: Berlin 2870344
oder schreiben Sie an folgende Adresse:

VEB Verlag Technik
Redaktion ELEKTRIE
PSF 201
Berlin
1020

Vorausberechnung der Durchschlagspannung langer Luftisolierstrecken bei Belastung mit Schaltimpulsspannungen kritischer Stirnzeit

E. Lemke, KDT; Dresden

Mitteilung aus der Sektion Elektrotechnik
der Technischen Universität Dresden

Formelzeichen und Indizes

a_0	kritische Streamerreichweite
a_{D0}	beim Elektrodenabstand D_0 berechnete kritische Streamerreichweite
a_{R0}	reduzierte kritische Streamerreichweite
D	Elektrodenabstand
D_0	bestimmter Elektrodenabstand, bei dem Versuchsdaten experimentell ermittelt wurden
E_L	Gradient am Kopf der Leaderentladung
E_S	mittlerer Gradient in der Streamerentladung
U_B	50-%-Durchschlagspannung
U_{B0}	50-%-Durchschlagspannung bei vorgegebenem Elektrodenabstand D_0
H	Leiterseilhöhe
H'	Objekthöhe
S	Objektquerschnitt

Im Rahmen des CIGRE-Studienkomitees SC 33 Isolationskoordination, WG 03 Hochspannungs-Prüf- und -Meßtechnik, wurden in den vergangenen Jahren umfangreiche Vergleichsmessungen zum Durchschlag langer Luftisolierstrecken bei Schaltimpulsspannungen durchgeführt. Die Analyse dieser Meßergebnisse führte zu Berechnungsformeln, die eine Vorausbestimmung der 50-%-Durchschlagspannung grundlegender Luftisolieranordnungen für Freileitungen und Stationen ermöglichen [1]. Anfängliche Versuche, die Durchschlagspannung unter Nutzung halbempirischer Durchschlagmodelle, basierend auf dem Funkenstreckenfaktor [2] sowie auf der Leadereinsetzspannung [3], zu berechnen, führten nicht zum Erfolg. Eine für technische Belange akzeptable Genauigkeit konnte schließlich nur dadurch erreicht werden, daß die o.g. Modelle auf der Grundlage experimenteller Daten kalibriert wurden. Im Ergebnis wurden sogenannte generalisierte Funkenstreckenfaktoren eingeführt [1]. Die darauf beruhenden Formeln zur Vorausbestimmung der Durchschlagspannung charakteristischer Freileitungs- und Stationsisolieruugen sind jedoch teilweise recht unüberschaubar. Außerdem können unterschiedliche Elektrodenkonfigurationen nicht durch eine einzige Beziehung mit variablen Parametern beschrieben werden. Daher war es naheliegend zu untersuchen, ob das Streamer-Leader-Modell [4] bei entsprechender Kalibrierung eine einfachere Möglichkeit zur Vorausberechnung der 50-%-Durchschlagkennlinien liefert.

1. Kalibrierung des Streamer-Leader-Modells

1.1. Berechnungsformel

Das Streamer-Leader-Modell basiert auf der entladungsphysikalischen Vorstellung, daß bei Entladungen in langen Luftisolierstrecken eine Reihenschaltung von Streamer- und Leaderentladung existiert, die unmittelbar vor dem Durchschlag die Funkenstrecke überbrückt [4]. Demzufolge ist die Durchschlagspannung aus dem Spannungsabfall über diesen Entladungsformen berechenbar. Für stark inhomogene, unsymmetrische Elektrodenanordnungen wurde bei Belastung mit positiver Schaltimpulsspannung kritischer

Dr. sc. techn. *Eberhard Lemke* ist Dozent an der Sektion Elektrotechnik/Wissenschaftsbereich Hochspannungstechnik der Technischen Universität Dresden.

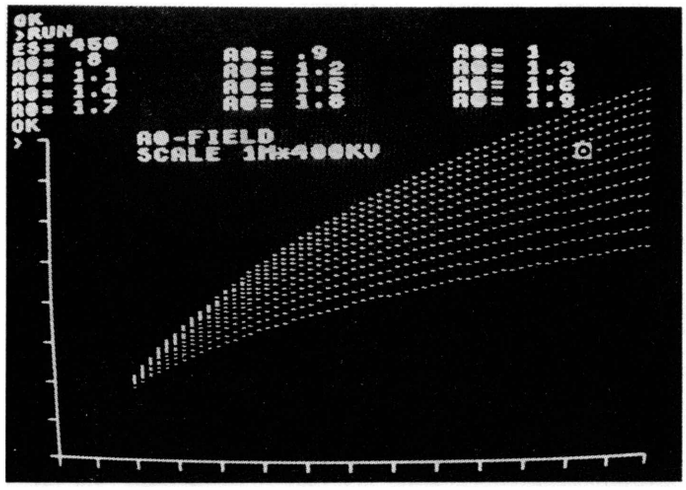


Bild 1. Kennlinienfeld der 50 %-Durchschlagspannung, berechnet nach (1) für $E_S = 450$ kV/m und $E_L = E_S/3$
Untere Kennlinie: Parameter $a_0 = 0{,}8$ m
Obere Kennlinie: Parameter $a_0 = 1{,}9$ m
[o] Meßpunkt, entspr. Parameter $a_0 = 1{,}5$ m ($D_0 = 12$ m; $U_{B0} = 2690$ kV)
Achsenkreuz horizontal: Elektrodenabstand D, Teilung 1 m
vertikal: 50- %-Durchschlagspannung, Teilung 400 kV

Scheitelzeit[1]) folgende Beziehung für die 50-%-Durchschlagspannung U_B als Funktion des Elektrodenabstandes D gefunden [5]:

$$U_B = E_S a_0 [1 + \ln (D/a_0)] + E_L a_0 \ln [D/a_0 - l_n (D/a_0)]. \quad (1)$$

Dabei sind E_S der mittlere Streamergradient und E_L der Gradient am vorwachsenden Leaderkopf. Die kritische Streamerreichweite, die für die Zündung einer stabilen Leaderentladung erforderlich ist, wird durch a_0 symbolisiert.
Im Hinblick auf eine universelle Anwendbarkeit der Berechnungsformel (1) empfiehlt sich eine Anpassung an experimentell verfügbare Daten. Für eine derartige Kalibrierung [1] können die Parameter E_S, E_L und a_0 genutzt werden.

1.2. Streamergradient E_S

Für positive Entladungen in langen Luftfunkenstrecken kann ein mittlerer Streamergradient von $E_S = 450$ kV/m zugrunde gelegt werden [6]. Bei negativer Polarität wird in Anlehnung an Untersuchungen der *Les Renardières Group* [7] ein Wert von $E_S = 1000$ kV/m angenommen. In Elektrodenkonfigurationen, die keine extreme Unsymmetrie aufweisen (z. B. Stab-Stab-Anordnung), erfolgt die Entladungsentwicklung von beiden Elektroden, d. h., es sind sowohl positive als negative Streamerentladungen am Durchschlagprozeß beteiligt. Der effektive Streamergradient derartiger bipolarer Entladungen liegt demzufolge zwischen 450 und 1000 kV/m. Eine Abschätzung ist aus der auf den Elektrodenabstand bezogenen Durchschlagspannung im Bereich von 1 bis 2 m möglich, da dann die Leaderentladung noch keinen dominierenden Einfluß auf den Durchschlagprozeß hat [5].
Der Gradient am Kopf der positiven Leaderentladung wird nach [6] zu 150 kV/m angenommen, d. h. $E_L/E_S = 1/3$. Für negative und bipolare Entladungen liegen noch unzureichende Kenntnisse bezüglich des Prozesses und der Kennwerte der Leaderentladung vor. Im Hinblick auf eine Vereinfachung des Berechnungsmodells wird in Analogie zur positiven Entladung ebenfalls ein Verhältnis $E_L/E_S = 1/3$ vorausgesetzt.

1.3. Kritische Streamerreichweite a_0

Eine Abschätzung der kritischen Streamerreichweite a_0 ist nur auf indirektem Wege möglich, da a_0 nicht aus (1) separiert werden kann. Ein erster Weg besteht darin, die bei einem gewählten Elektrodenabstand D_0 gemessene 50-%-Durchschlagspannung U_{B0} in ein Kennlinienfeld mit a_0 als Parameter einzutragen (Bild 1). Aus der Zuordnung des Wertepaares (D_0, U_{B0}) zu der entsprechenden Kennlinie folgt dann der gesuchte Parameter. Im Beispiel nach Bild 1 beträgt $a_0 = 1{,}5$ m.
Eine weitere Möglichkeit besteht in der analytischen Ermittlung von a_0 bei Vereinfachung von (1). Diese führt nach [5] auf die Näherung

$$a_{D0} = 0{,}266 \cdot U_{B0}/(1{,}42\, E_S - U_{B0}/D_0), \quad (2)$$

[1]) Diese Scheitelzeit liegt im Bereich einiger 100 µs und führt zu optimalen Bedingungen für die Entladungsausbreitung. Demzufolge erreicht die Durchschlagspannung bei der kritischen Scheitelzeit einen minimalen Wert.

wobei a_{D0} die dem jeweiligen Elektrodenabstand D_0 zugeordnete kritische Streamerreichweite ist. Ein für jede Konfiguration typischer Wert ergibt sich durch Einführung der reduzierten kritischen Streamerreichweite [5]:

$$a_{R0} = a_{D0}/[1 + (0{,}01 \cdot D_0)^{1/2}]. \quad (3)$$

Daraus folgt für jeden beliebigen Elektrodenabstand D die kritische Streamerreichweite zu:

$$a_0 = a_{R0} \cdot [1 + (0{,}01 \cdot D)^{1/2}]. \quad (4)$$

2. Vergleich von Berechnungsmodellen

Auf der Grundlage der Gln. (1) bis (4) wurde ein BASIC-Programm für Mikrorechner erstellt, das eine Vorausberechnung der 50-%-Durchschlagspannung von Luftisolierungen im Abstandsbereich von etwa 2 m bis über 10 m bei Belastung mit Schaltimpulsspannungen kritischer Stirnzeit ermöglicht. Dadurch ist ein einfacher Vergleich mit anderen Berechnungsmodellen gegeben. Nachfolgend seien einige ausgewählte Beispiele von Vergleichsrechnungen vorgestellt.
Für die Modellanordnung Stab-Platte liegen umfangreiche experimentelle Daten vor, und es existieren mehrere Berechnungsmodelle. Für die positive Polarität wird häufig die Beziehung

$$U_B = 3450 / [1 + 8/(D/\mathrm{m})] \text{ kV} \quad (5)$$

verwendet [8]. Einen Vergleich der nach dieser Formel berechneten Durchschlagkennlinie mit der nach (1) berechneten Kennlinie zeigt Bild 2a. Zwecks Kalibrierung von (1) wurde $E_S = 450$ kV/m verwendet und für $D_0 = 8$ m der Wert $U_{B0} = 1725$ kV aus (5) berechnet. Daraus folgt dann nach (2) bis (4) der charakteristische Wert $a_{R0} = 0{,}844$ m für die reduzierte kritische Streamerreichweite. Die Kennlinie in Bild 2 zeigen eine bemerkenswert gute Übereinstimmung. Daher wurde auch darauf verzichtet, die den Kennlinien zugeordneten Punkte besonders zu kennzeichnen. Analog wurde auch bei den folgenden Vergleichen verfahren.
Experimentelle Untersuchungen bis $D = 27$ m ergaben, daß (5) nur bis etwa 13 m anwendbar ist. Für noch größere Elektrodenabstände wurde die Beziehung

$$U_B = (1400 + 55\, D/\mathrm{m}) \text{ kV} \quad (6)$$

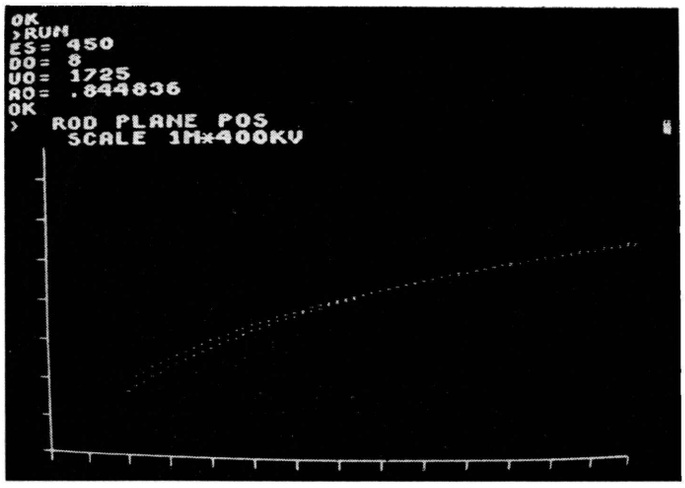
empfohlen [9]. Wie Bild 2b zeigt, führt eine Nachrechnung mittels (1) unter Beachtung von (2) bis (4) auch im extrem großen Abstandsbereich bis über 25 m zu einer guten Approximation der Berechnungsformeln nach (5) und (6).
Für die Stab-Platte-Anordnung negativer Polarität können die verfügbaren experimentellen Daten durch die Beziehung

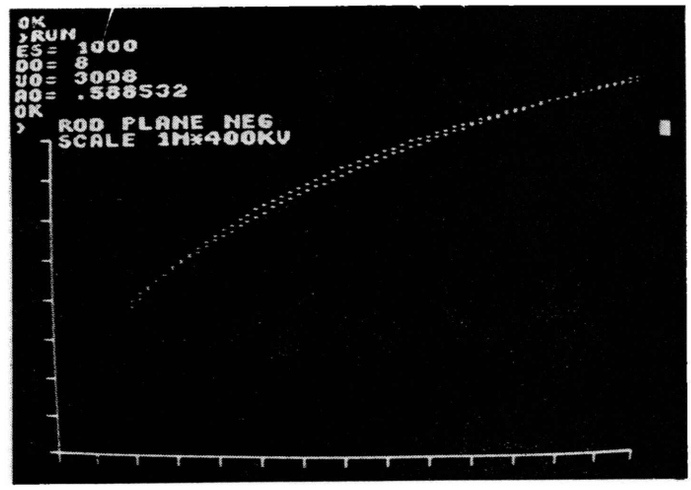
$$U_B = 1180\, (D/\mathrm{m})^{0{,}45} \text{ kV} \quad (7)$$

angeglichen werden [9]. Die Nachrechnung gemäß (1) ergibt bei dem angenommenen negativen Streamergradienten von 1000 kV/m ebenfalls eine gute Übereinstimmung beider Kennlinie (Bild 3).
Analoge Vergleiche für die Leiter-Platte-Anordnung positiver und negativer Polarität ergaben wiederum eine bemerkenswert gute Übereinstimmung von (1) mit bisher bekannten Berechnungsformeln. Als Ergebnis einiger ausgewählter Vergleichsrechnungen enthält Tafel 1 eine Zusammenstellung der kennzeichnenden Parameter E_S und a_{R0}, die eine gute Angleichung von (1) an die Berechnungsformeln ermöglichen, die in [1] für charakteristische Elektrodenanordnungen angegeben wurden. Im Abstandsbereich $2\text{ m} < D < 14$ m ist die Abweichung im allgemeinen kleiner als ± 3 %.
Weitere Nachrechnungen ließen erkennen, daß mittels (1) auch bei komplizierten Anordnungen zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden können. So gilt z. B. für eine Leiterseilanordnung, unter der sich ein geerdetes Objekt befindet, nach [1] die Berechnungs-

Tafel 1. Kennzeichnende Parameter E_S und a_{R0} für ausgewählte Grundanordnungen

Anordnung	Polarität	E_S [kV/m]	a_{R0} [m]	Höhe der Erdelektrode [m]
Stab-Platte	+	450	0,84	
	—	1000	0,59	
Leiter-Platte	+	450	1,05	
	—	1000	0,65	
Stab-Stab	+	530	0,75	2
	+	610	0,80	10
Leiter-Stab	+	640	0,70	2
	+	780	0,75	10





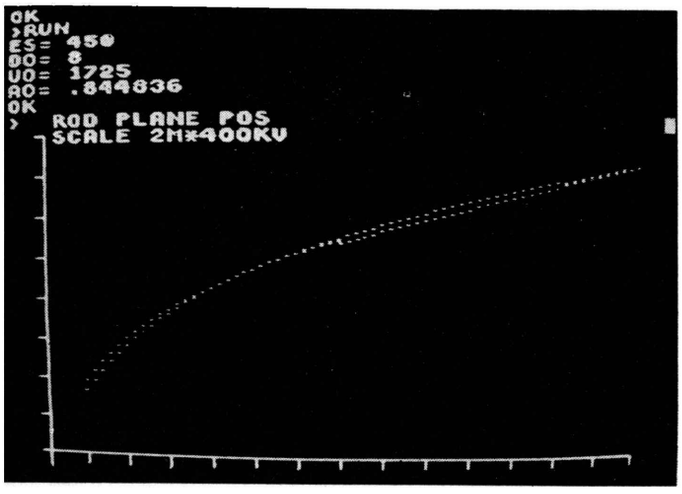


Bild 2. Durchschlagkennlinien der Anordnung positiver Stab-Platte

a) Vergleich der Berechnungen gem. (1) und (5) für 2 m $< D <$ 14 m

b) Vergleich der Berechnungen gem. (1) für 2 m $< D <$ 28 m sowie (5) für 2 m $< D <$ 14 m und (6) für 14 m $< D <$ 28 m

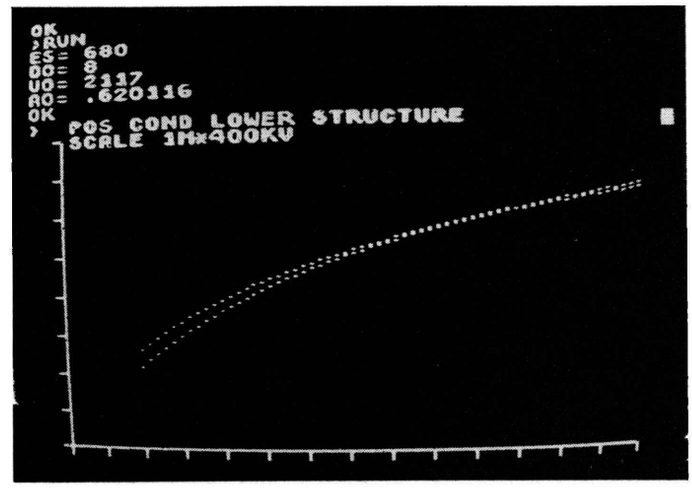


Bild 3. Durchschlagkennlinien der Anordnung negativer Stab-Platte; Vergleich der Berechnungen gem. (1) und (7) für 2 m $< D <$ 14 m

Bild 4. Durchschlagkennlinien einer Leiterseilanordnung, unter der sich ein geerdetes Objekt befindet
Untere Kennlinie berechnet nach (8)
Obere Kennlinie berechnet nach (1)

formel:

$$U_B = 3450\,\{1{,}15 + 0{,}81\,(H'/H)^{1{,}167} + 0{,}02\,(H'/D) - [0{,}67 - \exp(-2\,S/D)]\,[1{,}209\,(H'/H)^{1{,}167} + 0{,}03\,(H'/D)]\}/[1 + 8\,(D/\mathrm{m})]\ \mathrm{kV}. \quad (8)$$

Hier sind H die Leiterseilhöhe, H' die Objekthöhe und S der Querschnitt des Objektes. Auch diese recht komplizierte Formel kann durch (1) bei entsprechender Kalibrierung mit akzeptabler Genauigkeit approximiert werden (Bild 4).
Orientierende Abschätzungen für Phase-Phase-Isolierungen ergaben ebenfalls eine brauchbare Approximation experimentell ermittelter Durchschlagkennlinie mittels (1) [5].

3. Schlußfolgerungen

Aufgrund der komplex ablaufenden Entladungsprozesse in langen Luftisolierungen ist ihre umfassende mathematische Beschreibung nicht möglich. Demzufolge kann auch keine, von Experimenten unabhängige Vorausberechnung der Durchschlagkennlinien erwartet werden. Vielmehr sind stets experimentelle Ausgangsdaten erforderlich, um die verfügbaren mathematischen Durchschlagmodelle zu kalibrieren. Die Bedeutung derartiger Modelle besteht vor allem darin, daß der im allgemeinen große Prüfaufwand bei der experimentellen Aufnahme von Durchschlagkennlinien minimiert werden kann.
Bisher wurden in der Literatur für unterschiedliche Konfigurationen und Polaritäten auch unterschiedliche Berechnungsformeln angegeben. Im Hinblick auf die rechnergestützte Bemessung langer Luftisolierstrecken bietet demgegenüber das Streamer-Leader-Modell den Vorteil einer Vereinheitlichung der Berechnungsverfahren. Die verfügbaren Parameter E_S und a_0 ermöglichen eine einfache Anpassung des Berechnungsmodells an experimentelle Versuchsdaten, die bei einem einzigen Elektrodenabstand D_0 ermittelt wurden. Für unterschiedliche Elektrodenanordnungen und Polaritäten wird eine für technische Belange ausreichende Genauigkeit der berechneten Durchschlagkennlinien im Abstandsbereich von etwa 2 m bis über 10 m erreicht. Bei erhöhten Genauigkeitsanforderungen ist für D_0 ein Abstandsbereich zu wählen, für den die jeweils interessierende technische Isolieranordnung bemessen werden soll.

Literatur

[1] *Thione, L.:* Evaluation of the switching impulse strength of external insulation. electra 94 (1984) 5, S. 77—95
[2] *Paris, L.; Cortina, R.:* Switching and lightning impulse discharge characteristics of large air gaps and long insulator strings. IEEE Trans. PAS 87 (1968) 4, S. 947 bis 957
[3] *Carrara, G.; Thione, L.:* Switching surge strength of large air gaps: A physical approach. IEEE Trans. PAS 95 (1976) 2, S. 512—524
[4] *Lemke, E.:* Der elektrische Durchschlag in Luft bei Schaltspannungen. ELEKTRIE, Berlin 20 (1966) 5, S. 195—198
[5] *Lemke, E.:* Calibration procedure for the streamer leader model with respect to the predeterminiation of the SI strength of long air gaps. CIGRE-SC 33-WG 01 (1985) 28 IWD
[6] *Lemke, E.:* Beitrag zur Abschätzung der Durchschlagspannung langer Luftfunkenstrecken. Z. elektr. Inform.- u. Energietechnik, Leipzig 3 (1973) 4, S. 186 bis 192
[7] *Les Renardières Group:* Negative discharges in long air gaps at Les Renardières — 1978 results. electra 74 (January 1981), S. 5—216
[8] *Gallet, G.; Leroy, G.:* Une nouvelle expression de le tenue diélectrique des grandes intervalles d'air. EdF-Bull., serie B (1973) 3/4, S. 71—82
[9] *Pigini, A.; Rizzi, G.; Brambila, R.; Garbagnati, E.:* Switching impulse strength of very large air gaps. 3rd Intern. Symp. on High Voltage Engineering. Milan (1979) paper 52.15

EA 5668

Eine neue Steuerung für Impulsspannungs-Prüfgeneratoren

H. Bachmann, KDT, Dresden; M. Köckritz, KDT, Dresden; G. Vetters, KDT, Radebeul

Mitteilung aus dem VEB Transformatoren- und Röntgenwerk „Hermann Matern" Dresden

Experimentelle Untersuchungen mit Impulsspannungen spielen eine wesentliche Rolle in der hochspannungstechnischen Forschung, Entwicklung, Qualitätssicherung und Ausbildung. Wegen des zufälligen Charakters der dem Verhalten der Prüflinge zugrunde liegenden Prozesse [1] sind Großzahluntersuchungen weit verbreitet. Im Interesse einer möglichst guten Reproduzierbarkeit der Ergebnisse wurden bereits frühzeitig [2] elektronische Geräte eingesetzt, die die Steuerung der Prüfgeneratoren im Hinblick auf eine hohe Wiederholgenauigkeit ergänzten und subjektiv auf den Prüfablauf wirkende Einflüsse minderten. In der Folgezeit entstanden Geräte und Gerätesysteme, die die halb- und vollautomatische Durchführung von Impulsspannungsprüfungen und eine datenverarbeitungsgerechte Erfassung der Meß- und Prüfwerte gestatteten [3] [4]. Im folgenden wird eine neue Steuerung für Impulsspannungs-Prüfgeneratoren beschrieben, die einen halbautomatischen Prüfablauf ermöglicht und bei Kopplung mit einem Mikrorechner den vollautomatischen Betrieb gestattet.

1. Anforderungen an die Steuerung der Impulsspannungs-Prüfgeneratoren

Von einer modernen Steuerung wird gefordert, daß

- außer dem halbautomatischen Normalbetrieb einerseits durch Anschluß eines Mikrorechners (on-line-Betrieb) ein vollautomatischer und andererseits für Spezialaufgaben ein manuell gesteuerter Prüfablauf möglich ist
- die Sicherheit für den Bediener gewährt ist und Zerstörungen von Apparaturen bei Fehlbedingungen verhindert werden (z. B. Ausschalten des Betriebsschutzes beim Öffnen der Sicherheitsschleife, bei Überspannung bzw. -strom)
- die Aufladung der Kondensatorenbatterie bis zum Sollwert optimal mit hoher Genauigkeit nach einer von Ladespannung und -zeit abhängigen Funktion erfolgt
- die Einstellung des Zündfunkenstreckenabstandes automatisch, entsprechend der vorgewählten Ladespannung erfolgt
- die Triggerung des Oszilloskopes, des Prüfgenerators, der Abschneidefunkenstrecke und einer zweiten Hochspannungs-Prüfanlage phasen- und zeitgerecht möglich ist
- kurz vor der Entladung des Prüfgenerators automatisch ein Kameraverschluß geöffnet und ein Warnsignal abgegeben werden kann
- die Zählung der vom Prüfgenerator abgegebenen Impulse und der Prüflingsdurchschläge möglich ist.

2. Konstruktiver Aufbau und Wechselwirkungen (vgl. Bild 1)

Die Steuerung von Impulsspannungs-Prüfgeneratoren erfolgt von einem Steuer- und Meßplatz aus, der aus einem Steuerschrank (siehe dazu Foto auf der zweiten Umschlagseite dieses Heftes) und einem Tisch besteht.

Der Steuerschrank beinhaltet von oben nach unten

- die Spannungs-Meßeinrichtung *MU*, die zur Messung des Scheitelwertes der auf den Prüfling abgegebenen Impulsspannung dient
- das Impulsspannungssteuergerät SQS 6/1 (vgl. Abschnitt 4)
- den Steuer- und Meßeinschub (SME) mit zugehörigem Leistungsteil H 288 (vgl. Abschnitt 3)
- einen Netzregler (NR).

Dipl.-Phys. *Herbert Bachmann* und Dipl.-Ing. *Gerd Vetters* sind Entwicklungsingenieure im Anlagenlabor. Ing. *Manfred Köckritz* ist Konstrukteur in der Anlagenkonstruktion des VEB Transformatoren- und Röntgenwerk „Hermann Matern" Dresden.

Weitere Bestandteile der Steuerung sind:

- ein Thyristor-Schaltschrank (*Th*), der am Gleichspannungserzeuger (*GSE*) angebaut ist. Hier erfolgt die Leistungseinspeisung der gesamten Prüfanlage. Im Schaltschrank befinden sich u. a. das Haupt- und Betriebsschutz und die Leistungsthyristoren mit ihren Ansteuermodulen.
- zwei Schaltkästen, die im Grundrahmen des Impulsspannungs-Prüfgenerators (*IPG*) eingebaut sind und die vor allem die Umsetzung der vom Schaltschrank kommenden Steuersignale für die Antriebe (z. B. Zünd- und Abschneidefunkenstrecke) bewirken. Von hier aus erfolgt die Bedienung der Erdungseinrichtung. Ein manueller Betrieb der Impulsspannungs-Prüfanlage ist auch ohne das Gerät SQS 6/1 möglich.

3. Steuer- und Meßeinschub

3.1. Allgemeines

Der Steuer- und Meßeinschub (*SME*) bildet das Zentralgerät der neuen Steuerung für Impulsspannungs-Prüfgeneratoren. In zwei Ausführungen hergestellt, ist es als Gerät *SME 1* für die Baureihe K [6] der Impulsspannungs-Prüfgeneratoren (250 kV···1500 kV bei einer Ladespannung von 125 kV und einpoliger Einspeisung) und als Gerät *SME 2* für die Baureihe B [7] (1 MV···7 MV einer bei Ladespannung von 250 kV und zweipoliger Einspeisung) geeignet. Die Funktion des Gerätes *SME* ist in Einheit mit dem Leistungsteil H 288 zu betrachten, das einen Umsetzer der Steuersignale zwischen 24 V-GS-Ebene und 220 V-WS-Ebene darstellt.

3.2. Wirkungsweise (vgl. Bild 2)

3.2.1. Block Steuerung

Der Block Steuerung umfaßt die Funktionen: Haupt- und Betriebsschütz, Polaritätsumschaltung und Erdungseinrichtung. Das Be-

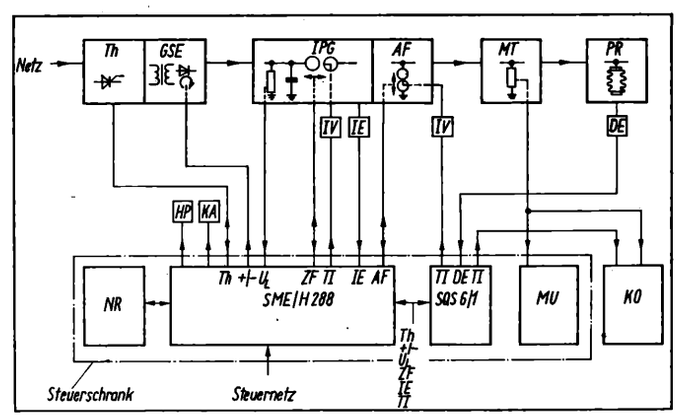
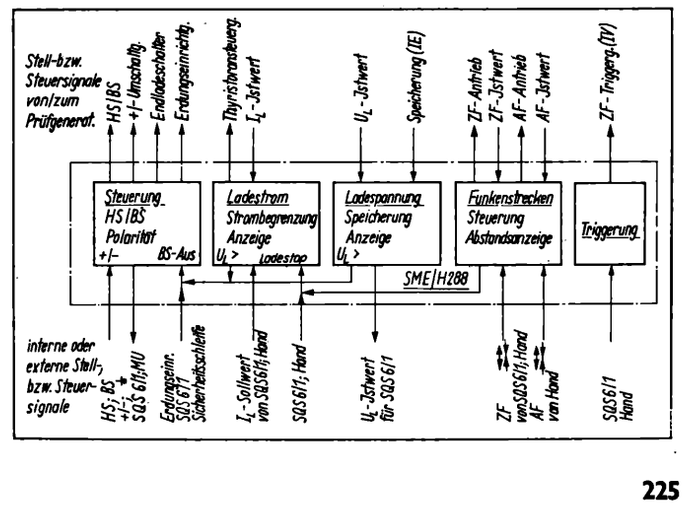


Bild 1. Blockschaltung Impulsspannungs-Prüfanlage
AF Abschneidefunkenstrecke; *DE* Durchschlagserfassung; *GSE* Gleichspannungserzeuger; *HP* Hupe; *IE* Impulserfassung; *IPG* Impulsspannungs-Prüfgenerator; *IV* Impulsverstärker (Typ SQS 2); *KA* Kamera; *KO* Katodenstrahl-Oszilloskop; *MU* Spannungs-Meßeinrichtung; *MT* Impulsspannungs-Meßteiler; *NR* Netzregler; *PR* Prüfling; *SME* Steuer- und Meßeinschub, *SQS 6/1* Impulsspannungs-Steuergerät; *Th* Thyristorschaltschrank; *TI* Triggerimpuls; U_L Ladespannung; *ZF* Zündfunkenstrecke

Bild 2. Blockschaltung Steuer- und Meßeinschub SME/H 288
BS Betriebsschütz; *HS* Hauptschütz; I_L Ladestrom; $I_L >$ Lade-Überstrom; $UL >$ Lade-Überspannung; weitere Abkürzungen siehe Bild 1



triebsschütz ist verriegelt. Es ist nur dann einschaltbar, wenn eine entsprechende Versuchsvorbereitung durchgeführt wurde (z. B. Sicherheitsschleife geschlossen, Prüfgenerator enterdet). Es wird bei groben Fehlbedienungen (z. B. Überstrom, Überspannung) bzw. durch entsprechende Befehle peripherer Geräte (z. B. Gerät SQS 6/1, vgl. Abschnitt 4.2.4.) ausgeschaltet. Die Betätigung von Haupt- und Betriebsschütz und der Polaritätsumschaltung erfolgt in der Standardausführung der Steuerung von Hand am *SME*, die Schaltzustände der Schütze, die Polarität, der Erdungszustand und eventuelle Quellen der Betriebsschützsperre werden durch Leuchtdioden angezeigt. Zusätzlich zur Bedienung der Erdungseinrichtung vom Fuß des Prüfgenerators aus kann am Gerät *SME* ein Signal zum Erden abgegeben werden.

3.2.2. Block Ladestrom

Der Ladestrom (Primärstrom) wird wahlweise durch das Gerät SQS *6/1* oder von Hand eingestellt und analog angezeigt. Bei Handeinstellung wird der Strom in 3 Grobstufungen zwischen Null und einem vom Prüfgenerator abhängigen Nennwert vorgewählt. Im anderen Fall stellt sich der Ladestrom nach den am Gerät SQS 6/1 eingestellten Werten für Ladespannung und -zeit ein.
Wird der Nennladestrom des Generators überschritten (z. B. durch aufliegende Erdstangen), setzt automatisch eine Begrenzung des Stromes auf den Nennwert ein. Die Ansteuerschaltung für den Thyristorsteller (Phasenanschnittsteuerung) ist ebenfalls Bestandteil des Gerätes *SME*. Der Thyristorsteller wird gesperrt (Ladestop), wenn sich eine Funkenstrecke bewegt, der Bediener es wünscht (Taste) oder wenn das Gerät SQS 6/1 oder andere periphere Geräte entsprechende Befehle abgeben. Die jeweilige Quelle der Ladestop-Signale wird durch Leuchtdioden angezeigt.

3.2.3. Block Ladespannung

Die Ladespannung wird an der 1. Stufe des Impulsspannungs-Prüfgenerators über Hochspannungsmeßwiderstände ermittelt. An einer 3stelligen Digitalanzeige wird ständig die aktuelle Ladespannung, die bei symmetrischer Einspeisung (*SME 2*, Baureihe B) der Summe der Beträge der Teilspannungen entspricht, angezeigt. Durch Tastendruck sind beim Gerät *SME 2* auch die Teilspannungen und die Differenzspannung anzeigbar. Nach jeder Zündung des Prüfgenerators erfolgt die Speicherung des Ladespannungsendwertes für etwa 3 s, wobei das Speichersignal über die Impulserfassung *IE* (vgl. Bild 1) direkt am Prüfgenerator gewonnen wird. Für das Gerät SQS 6/1 wird die Ladespannung ständig als Istwert bereitgestellt. Ist die Ladespannung bzw. ist eine Teilspannung größer als 131 kV bzw. die Differenzspannung größer als 12,5 kV, wird das Betriebsschütz ausgeschaltet.

3.2.4. Block Funkenstrecken

Die Ansteuerung der Antriebe für Zündfunken- und Abschneidefunkenstrecke (*ZF*, *AF*) erfolgt durch Tastendruck am Gerät *SME*. Für die Zündfunkenstrecke ist es möglich, den Abstand durch eine Automatik vom Gerät *SQS 6/1* aus einzustellen (vgl. Abschnitt 4.2.2.).
Bei der Anzeige der Abstände der Funkenstrecken wird jeweils der Widerstand von Präzisionswendelpotentiometern, die direkt mit den Antrieben gekoppelt sind, ausgewertet und digital 3stellig angezeigt.

3.2.5. Block Triggerung

Um einen Betrieb des Prüfgenerators auch ohne das Gerät SQS 6/1 zu ermöglichen, können im Gerät *SME* durch Handauslösung Triggerimpulse zur Zündung des Impulsspannungs-Prüfgenerators erzeugt werden. Sobald das Gerät SQS 6/1 angeschlossen ist, übernimmt dieses die Triggerung.

3.2.6. Anschluß Mikrorechner

Die bisher beschriebenen Funktionen umfassen die Standardausrüstung der TuR-Prüfanlagen. Darüber hinaus sind zahlreiche Schnittstellen vorgesehen, die den Anschluß externer Steuergeräte (z. B. Mikrorechner) gestatten. So ist es möglich, Steuersignale (z. B. Betriebsschütz-EIN-AUS, Polaritätswechsel, Ansteuerung der Funkenstreckenantriebe) einzugeben, sowie Schaltzustände (z. B. Haupt- und Betriebsschütz, Polarität, Erdung) und Meßwerte (z. B. Ladespannung, Funkenstreckenabstände) abzufragen.

4. Impulsspannungssteuergerät SQS 6/1

4.1. Anwendung

Das Gerät SQS 6/1 ergänzt das Gerät *SME* für die Durchführung halbautomatischer Prüfabläufe, läßt sich aber auch prinzipiell an

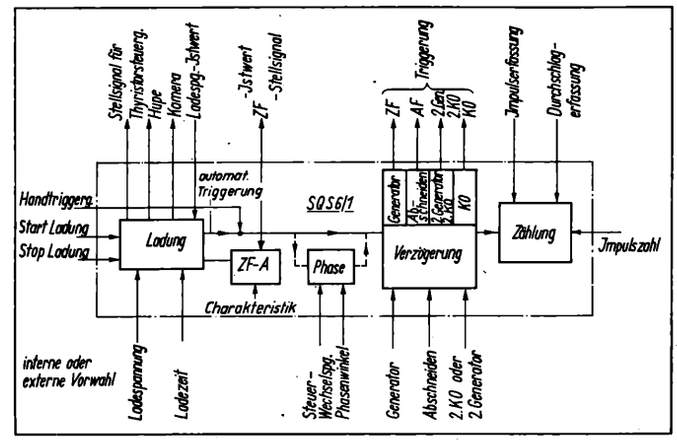


Bild 3. Blockschaltung Impulsspannungs-Steuergerät SQS 6/1
ZF-A Zündfunkenstreckenautomatik (weitere Abkürzungen siehe Bilder 1 und 2)

ältere TuR-Steuerungsvarianten anpassen. Darüber hinaus sind Anwendungen in Anlagen zur Erzeugung schwingender Schaltspannungen mit Prüftransformatoren (Schaltspannungszusätze) vorgesehen. Mit diesem Erzeugnis werden eine Reihe bisheriger Geräte [5] abgelöst. Neben der Verbesserung der technischen Parameter werden auch zahlreiche neue Funktionen realisiert.

4.2. Wirkungsweise (vgl. Bild 3)

In diesem Abschnitt wird die Wirkungsweise des Gerätes SQS 6/1 in der Standardausführung der neuen Steuerung beschrieben. Der Anwender kann an Hand der Dokumentation davon abweichende, interne Programmierungen einiger Steuerfunktionen vornehmen.

4.2.1. Block Ladung

Nach Einstellen von Ladespannung und Ladezeit an digitalen Vorwahlschaltern und der Eingabe eines Startbefehls (Taste) beginnt die geregelte Aufladung der Kondensatoren des Prüfgenerators derart, daß ein linearer Spannungsanstieg erfolgt, wobei bei 95 % der vorgewählten Ladespannung die Anstiegsgeschwindigkeit auf ein Fünftel reduziert wird. Die Triggerung des Prüfgenerators (vgl. Abschnitt 4.2.3.) geschieht wahlweise bei Erreichen der vollen Ladespannung oder nach Ablauf der vorgewählten Ladezeit, wobei dann bis dahin die Ladespannung konstant gehalten wird. Nach erfolgreicher Triggerung (bzw. nach Selbstzündungen) erfolgt ein erneuter Aufladevorgang wahlweise automatisch oder nach Eingabe eines erneuten Startbefehls. Während des Aufladevorgangs werden Signale zum Öffnen eines Kameraverschlusses und zur Abgabe eines Warnsignals (2 s vor Triggerung) erzeugt. Dem Bediener werden durch Leuchtdioden markante Punkte des Aufladevorgangs signalisiert (z. B. Blinklicht bei Spannungsanstieg).
Ladestop-Signale (vgl. Abschnitt 3.2.2.) können den Aufladevorgang unterbrechen. Steigt beispielsweise die Ladespannung fehlerhaft auf einen Wert größer 105 % der vorgewählten Ladespannung an, gibt das Gerät SQS 6/1 selbst ein Ladestop-Signal ab.

4.2.2. Block Zündfunkenstrecken-Automatik (ZF-A)

Bereits bei der Vorwahl der Ladespannung werden die Zündfunkenstrecken automatisch auf den entsprechenden Abstand gebracht, indem Stellbefehle an das Gerät *SME* abgegeben werden (vgl. Abschnitt 3.2.4.) Zur Istwerterfassung wird der Widerstand eines separaten Präzisionswendelpotentiometers, das direkt mit dem Antrieb gekoppelt ist, ausgewertet. Die Zündcharakteristik (Zusammenhang zwischen Ladespannung und Zündfunkenstreckenabstand) ist intern in EPROM's, die steckbar sind, abgelegt. Es können bis zu vier Charakteristiken gespeichert werden, die z. B. unterschiedlichen Wellenformen oder Generatorschaltungen zugeordnet sind. Die jeweiligen Charakteristiken des Generators können an den Aufstellungsort (Höhe über Meeresspiegel) angepaßt werden.

4.2.3. Triggerung (Blöcke Phase und Verzögerung)

Der Triggervorgang wird durch den Block Ladung automatisch (vgl. Abschnitt 4.2.1.) oder über Taste manuell eingeleitet. Zunächst kann der Zündzeitpunkt bis zum Erreichen eines, an digitalen Vorwahlschaltern eingestellten Phasenwinkels der Netzspannung oder einer externen Wechselspannung ($16^2/_3$ Hz bis 150 Hz) verschoben werden. Diese Funktion ist abschaltbar. Eine weitere, in Kanäle aufgeteilte Verzögerung gestattet die gestaffelte Triggerung von

maximal 4 Vorgängen. Bei der standardmäßigen Programmierung des Gerätes SQS 6/1 ist vorgesehen, daß

— nach Auslösung des Triggervorganges durch die Blöcke Ladung und Phase und einer festen, intern eingestellten Verzögerungszeit ein Oszilloskop (KO) getriggert wird (KO-Kanal)
— nach einer sich dem KO-Kanal anschließenden Verzögerungszeit die Triggerung der Zündfunkenstrecken (ZF) erfolgt (Generator-Kanal)
— nach einer gleichzeitig mit dem Generator-Kanal beginnenden Verzögerungszeit eine 2. Hochspannungs-Prüfanlage oder ein 2. Oszillokop getriggert wird (Kanal 2. Generator/2. KO)
— nach einer weiteren Verzögerung, die wahlweise nach dem Generator-Kanal oder mit der Zündung des Prüfgenerators beginnt, die Abschneidefunkenstrecke (*AF*) getriggert wird (Abschneide-Kanal). Dieser Kanal ist abschaltbar und gewährleistet selbst bei ungetriggertem Betrieb (z. B. Selbstzünden) das zeitgerechte Abschneiden.

Darüber hinaus können durch interne Programmierung die Kanäle anders gestaffelt werden. Die Verzögerungszeiten der Kanäle Generator, 2. Generator/2. KO und Abschneiden sind innerhalb von 3 gemeinsamen Zeitbereichen an digitalen Vorwahlschaltern einzeln einstellbar (bis maximal 9,99 ms).

4.2.4. Block Zählung

Von den Baugruppen Impulserfassung *IE* und Durchschlagerfassung *DE* (vgl. Bild 1) werden dann Signale abgegeben, wenn der Prüfgenerator gezündet hat bzw. wenn ein Durchschlag am Prüfling erfolgte. Diese Signale können bei Bedarf mit elektro-mechanischen Zählern, für Impulse und Durchschläge getrennt, gezählt werden. Das Gerät SQS 6/1 schaltet das Betriebsschütz aus, wenn der Zähler für die Impulse eine voreingestellte Zahl erreicht hat. Weiterhin werden die von der Impulserfassung kommenden Signale ausgewertet, um durch Leuchtdioden anzuzeigen, wenn eine Nichtzündung (erfolgloser Triggerversuch der Zündfunkenstrecke) oder eine Selbstzündung vorliegt.

4.2.5. Anschluß Mikrorechner

Ähnlich wie beim Gerät *SME* sind Anschlußmöglichkeiten für einen Mikrorechner vorgesehen. Dadurch ist es möglich, die digitalen Sollwerte (z. B. Ladespannung) von außen, für die einzelnen Blöcke getrennt wählbar, abzufragen oder einzugeben. Weiterhin sind Schalterstellungen abfragbar, Steuerbefehle (z. B. Start Ladung) können eingegeben werden.

5. Zusammenfassung

Mit der vorgestellten neuen Steuerung für Impulsspannungs-Prüfanlagen steht den Anwendern eine Ausrüstung zur Verfügung, die alle gegenwärtigen Forderungen bezüglich Bedienkomfort, Sicherheit und Zuverlässigkeit erfüllt. Durch Anschluß externer Geräte, insbesondere Mikrorechner, sind Aufrüstungen zum vollautomatischen Prüfbetrieb möglich.

Literatur

[1] *Hauschild, W.; Mosch, W.:* Statistik für Elektrotechniker. Berlin: VEB Verlag Technik 1984

[2] *Saxe, R. F.:* Automatische Steuerung und Anzeige bei Impulsspannungsprüfungen (engl.). Proc. IEE 102 (1955), S. 371—374

[3] *Feser, U.; Niederhauser, R.:* Trend zur Automatisierung von Impulsspannungsprüfungen. 2. ISH Zürich (1975) 3.3-05

[4] *Erdmann, D.; Miltmann, A.:* Gerätesystem für den halb- und vollautomatischen Betrieb von Hochspannungs-Prüfanlagen. ELEKTRIE, Berlin 35 (1981) 8, S. 434—436

[5] Prüfeinrichtungen, Meßeinrichtungen. Firmenschrift des VEB TuR Dresden, Nr. 805/5d, 1978

[6] *Schrader, W.; Obst, R.; Schmidt, W.:* Neue Blitz- und Schaltspannungs-Prüfgeneratoren für Labor- und Vor-Ort-Prüfungen. ELEKTRIE, Berlin 37 (1983) 4, S. 199—200

[7] *Schrader, W.:* Eine neue Baureihe von Blitz- und Schaltspannungs-Prüfgeneratoren. ELEKTRIE, Berlin 30 (1976) 8, S. 446—447

EA 5677

Digitales Scheitelspannungs-Meßgerät für Gleich- und Wechselspannungen

K. Thümmler, KDT; Dresden

Mitteilung aus dem VEB Transformatoren- und Röntgenwerk „Hermann Matern" Dresden

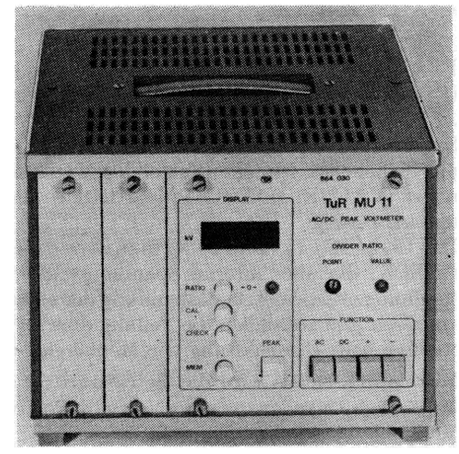


Bild 1
MU 11, Frontansicht

1. Anwendung

Neben der Erzeugung aller erforderlicher Spannungen für Hochspannungsprüfzwecke ist deren schnelle und genaue Messung Aufgabe jedes Prüfanlagen-Herstellers. Im VEB TuR Dresden wurde in diesem Sinne das Scheitelspannungsmeßgerät MU 11 für Wechsel- und pulsierende Gleichspannung entwickelt, dessen Anwendung neben der standardgerechten Hochspannungsmessung [1] überall erfolgen kann, wo Scheitelwerte $\hat{u}$ interessieren.

Mit Hilfe von Spannungsteilern, deren Übersetzungsverhältnis am Gerät MU 11 in den Grenzen 0,999 bis 999 eingestellt werden kann, ist die genaue Messung — bei direkter digitaler Darstellung des Meßergebnisses — für Spannungen bis $\hat{u} = 999$ kV[1]) möglich. Hierbei ist für Wechselspannungen die Bewertung $\hat{u}/\sqrt{2}$ und für Gleichspannungen $\bar{u}$ (arithmetischer Mittelwert) wirksam. Wird zusätzlich die Taste PEAK gesetzt, so erfolgt in beiden Fällen die Bewertung mit dem Scheitelwert $\hat{u}$. Die Eingangsparameter sowie die Gestaltung des Gerätes sind auf das TuR-Hochspannungs-Bausteinsystem [2] zugeschnitten, darüber hinaus sind aber Messungen mit beliebigen Spannungsteilern möglich.

Ohne Spannungsteiler können Spannungsmessungen bis $\hat{u} = 999$ V für Gleich- und Wechselspannungen (20 Hz bis 1000 Hz) vorgenommen) werden, allerdings ebenfalls nur Spannungen gegen Masse.

Zwecks Ermittlungen von Durch- bzw. Überschlagspannungen wurde das Gerät MU 11 mit Baustufen zur Speicherung des Spannungswertes im Durchschlagzeitpunkt ausgerüstet. Als Kriteriem für die digitale Speicherung wird hierbei die extrem schnelle Spannungsabsenkung benutzt. Wird die Spannung dagegen vergleichsweise langsam abgesenkt, so folgt die Digitalanzeige zügig dieser Absenkung.

2. Aufbau und Wirkungsweise

Das Gerät MU 11 ist als EGS-Gestelleinschub in den System-Maßen 160 mm × 160 mm × 300 mm paßfähig zur TuR-Steuer- und Meßtechnik ausgeführt und sowohl als Einschub als auch im EGS-Plattengehäuse A 240 mm × 160 mm × 300 mm lieferbar (Bild 1). In diesem ist Raum vorhanden zur Aufnahme des Niederspannungsteils des Spannungsteilers. Auf der Frontplatte sind im Feld „DIS-

Dipl.-Ing. *Klaus Thümmler* ist Entwicklungsingenieur im Anlagenlabor des VEB TuR Dresden.

[1]) Meßfehler: ± 1 % vom Meßwert ± 1 LSD

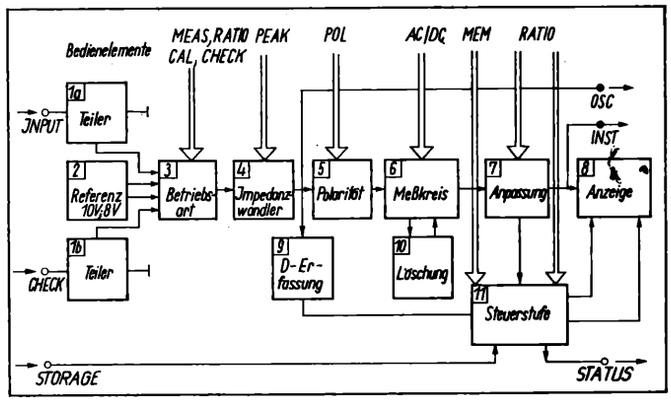


Bild 2. Prinzipschaltung des Scheitelspannungsmeßgerätes MU 11

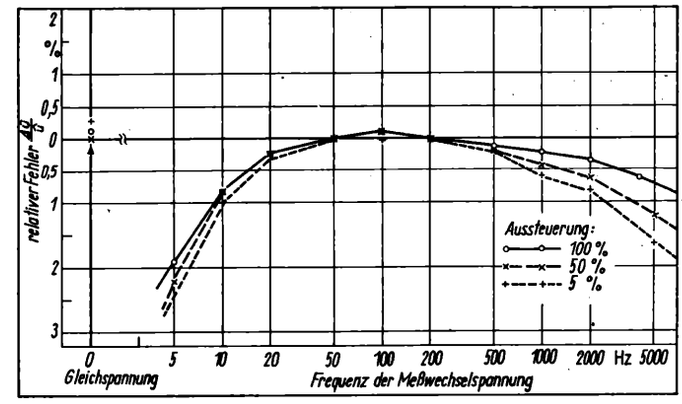


Bild 3. Amplitudenfrequenzgang

PLAY" die dreistellige Digitalanzeige und die Betriebsartentasten (PEAK, RATIO, CAL, CHECK, MEM) zusammengefaßt, im Feld „FUNCTION" befinden sich Tasten zur Wahl der zu messenden Spannungsart und deren Polarität. Das Feld „DIVIDER" enthält die Bedienelemente zur Einstellung des Teilerübersetzungsverhältnisses (VALUE, D.-POINT) und tritt — da nur selten benutzt — optisch zurück.

Das Gerät MU 11 (Bild 2) verfügt über zwei Eingänge INPUT und CHECK, die über interne Spannungsteiler (1*a*, 1*b*) die Eingangsspannungen an die Arbeitsspannung der elektronischen Schaltungen anpassen und zusätzlich die Teilung durch $1/\sqrt{2}$ realisieren. Eine Einstellung bzw. Umschaltung von Meßbereichen ist nicht erforderlich.

Mittels SIL-Relais wird die Betriebsart (*3*) gewählt und die Spannung über Impedanzwandler (*4*) und Polaritätswahlstufe (*5*) dem Meßkreis verarbeitungsgerecht zugeführt. Am Impedanzwandler zweigen der Ausgang OSC zum Anschluß eines Oszilloskops und die Durchschlagerfassung (*9*) ab. In der Betriebsart Messen (MEAS) verarbeitet der Meßkreis (*6*) je nach Modus Gleich- oder Wechselspannungen, die er aktiv, invertierend gleich- bzw. spitzenwertgleichrichtet. Auf ihn wirkt in Abhängigkeit von Eingangs- und Meßkreisspannung zeitverzögert die Lösch-Stufe (*10*), die den Meßkondensator entlädt. Über die Anpaßstufe (*7*) wird das Übersetzungsverhältnis $\ddot{u}$ des Spannungsteilers berücksichtigt und — bei kleinen Aussteuerungen — eine interne 10 : 1-Umschaltung des Displays bewirkt. In der Anzeigestufe (*8*) erfolgt die A/D-Wandlung, die Meßwert-Speicherung und Darstellung, wofür eine digitale Anzeigeeinheit aus der Fertigung des VEB Meßtechnik Mellenbach benutzt wird [3]. Beliebige Meßwerte können mittels der Taste MEM im Display gespeichert werden (dabei Blinken der Anzeige — und — wenn erwünscht — Signalton). Nach Ablauf einer intern einstellbaren Darstellzeit zeigt das Display wieder aktuelle Meßwerte an. Im Durchschlag-Fall erfolgt, wie bereits erwähnt, diese Speicherung automatisch, sie kann — z. B. zur Ermittlung der Teilentladungs-Einsetzspannung — aber auch extern über die Buchse STORAGE bewirkt werden.

Von der Referenzspannungsquelle (*2*) werden hochstabile Spannungen für die Betriebsarten Kalibrierung (CAL) und Einstellung des Teiler-Übersetzungsverhältnisses (RATIO) bereitgestellt. Die ordnungsgemäße Funktion des Meßgerätes kann durch CAL, Sollwert: 800 ± 2 kontrolliert werden.

Die Steuerstufe (*11*) besorgt interne Verriegelungen beim Einstellen der Betriebsarten, die Ansteuerung des Dezimalpunktes und dessen 10 : 1 — Umschaltung sowie die Speicherung und Löschung des Meßwertes und die Signalisierung der Betriebszustände.

4. Applikationshinweise

4.1. Anschluß an den Spannungsteiler

Bei der Anpassung des Gerätes MU 11 an einen Spannungsteiler sind im Interesse der korrekten Direktanzeige seine maximale Eingangsspannung $\hat{u}_E = 1000$ V, sein Eingangswiderstand $R_E = 4{,}24$ MΩ sowie das maximal einstellbare Übersetzungsverhältnis $\ddot{u} = 999$ zu beachten. Für kapazitive Spannungsteiler mit der Niederspannungskapazität C_N ist die Niederspannungszeitkonstante $\tau_N = C_N \times R_N \geqq 70$ ms zu dimensionieren, wobei R_N die Parallelschaltung des Entladewiderstandes von C_N mit dem R_E der MU 11 ist.

Für ohmsche Spannungsteiler ist ebenfalls R_E Parallelwiderstand zum Niederspannungswiderstand R_U und deshalb vom wesentlichem Einfluß auf das Übersetzungsverhältnis des Spannungsteilers.

4.2. Anschluß externer Geräte

Beide Ausgänge (OSC, INST) des Gerätes MU 11 sind mit internen Schutzwiderständen versehen, deren Werte beim Anschluß externer Geräte (Eingangsimpedanz Z_E) zu berücksichtigen sind. Für gebräuchliche Werte von Z_E, z. B. 1 MΩ//20 pF[2]), sind die sich ergebenden zusätzlichen Fehler infolge Spannungsteilung kleiner 0,1 %. Beim Anschluß von Analoginstrumenten, z. B. Schreiber, an INST kann die Zwischenschaltung eines Impedanzwandlers erforderlich sein, Digitalvoltmeter sind unmittelbar anzuschließen. Im Falle eines Durchschlages verschwindet die Analogspannung am Ausgang INST nach der internen Speicherung des Meßwertes im Display.

Soll der Durchschlagspannungswert auch extern festgehalten werden, so ist die Triggerung des angeschlossenen Digitalvoltmeters mittels eines Signals STATUS möglich, wobei dann eine einmalige Messung erfolgt. Eine Meßwert-Registrierung ist nur über ein externes Digitalvoltmeter und dessen Peripherie zu realisieren, das Gerät MU 11 hat keinen unmittelbaren Druckeranschluß.

4.3. Kontrolle der Meßgenauigkeit

Das Gerät MU 11 verfügt einerseits mittels einer internen hochstabilen Gleichspannung über die Möglichkeit einer Funktionskontrolle (CAL) und kann in der Betriebsart Kontrolle (CHECK) über den Eingang CHECK auch mit Wechselspannung hinsichtlich Meßgenauigkeit und Amplitudenfrequenzgang überprüft werden.

Im Frequenzbereich 20 Hz $\leqq f \leqq$ 1 kHz bleibt der Meßfehler unter 1 % vom Meßwert (Bild 3) und liegt auch im erweiterten Frequenzbereich (5 Hz $\leqq f \leqq$ 3 kHz) noch unter 3 %.

Wird — unter Beachtung von $R_E = 103$ kΩ — der CHECK-Eingang zur Messung von Spannungen verwendet ($\hat{u} \leqq 10$ V!), so können Gleich-, Wechsel- und auch unipolare, repetierende Impulsspannungen (z. B. TTL-Impulsfolgen) bis herab zu wenigen 100 mV scheitelbewertet gemessen werden.

5. Zusammenfassung

Mit der beschriebenen Entwicklung wurde ein handliches, einfach zu bedienendes Meßgerät zur schnellen und genauen Messung von Prüf-Hochspannungen geschaffen, das im Zusammenwirken mit praktisch allen Arten von Spannungsteilern — und auch gänzlich ohne Teiler — einen weiten Spannungsbereich, 0,1 V $\leqq \hat{u} \leqq$ 1000 kV, zu messen gestattet, wobei Gleichspannungen (wellige), Wechselspannungen (20 Hz . . . 1 kHz) und Impulsspannungsfolgen (z. B. $f = 50$ Hz, $t_i = 10$ µs) scheitelbewertet werden können.

Literatur

[1] IEC 60-3. High-voltage test techniques. MEASURING DEVICES

[2] *Hauschild, W.; Thümmler, K.; Wagner, V.; Pfaff, R.:* Bausteine zur Erzeugung und Messung hoher Gleich- und Wechselspannungen. ELEKTRIE, Berlin 38 (1984) 10, S. 377—380

[3] *Pabst, W.:* Digitale Anzeigeeinheit. radio fernsehen elektronik, Berlin 33 (1984) 8, S. 537

EA 5678

[2]) // entspricht 1 MΩ parallel 20 pF

Berechnung nichtstationärer Vorgänge in Hochspannungsprüfanlagen

J. Wolf, KDT; Dresden

Mitteilung aus dem VEB Transformatoren- und Röntgenwerk „Hermann Matern" Dresden

Hochspannungsprüfanlagen sind häufig Einzelanfertigungen, bei denen besondere Kundenwünsche realisiert werden müssen. An den ausgeführten Prüfanlagen sind nachträgliche Änderungen nur in beschränktem Umfang möglich. Deshalb ist es frühzeitig notwendig, vor Beginn der Konstruktion Aussagen über das Betriebsverhalten zu treffen.

Der rasche Fortschritt der Entwicklung fordert eine Verkürzung des Zeitaufwandes für Entwicklung, Konstruktion und Erprobung. Es bieten sich besonders Verfahren des rechnergestützten Entwurfs an, da bei Vorliegen eines geeigneten mathematischen Modells ein Problem mit geringerem Aufwand als im Experiment durch Variieren von Daten untersucht werden kann.

Das zum rechnergestützten Entwurf der Prüfanlagenschaltung benutzte mathematische Modell soll folgende Forderungen erfüllen:

— allgemeine Anwendbarkeit, um unterschiedliche Prüfanlagenschaltungen untersuchen zu können, ohne in den Rechenalgorithmus einzugreifen
— Dialogarbeitsweise, um abhängig von den Ergebnissen über den weiteren Verlauf der Rechnung entscheiden zu können
— kurze Rechenzeit.

Im folgenden ist ein Verfahren beschrieben, das im Dialog auf einem arbeitsplatzorientierten Kleinrechner die Berechnung stationärer und nichtstationärer Vorgänge in ein- oder mehrphasigen nichtlinearen elektrischen Schaltungen von Hochspannungsprüfanlagen ermöglicht.

1. Rechenverfahren

Zur Berechnung der Strom- und Spannungsverläufe eignen sich Rechenverfahren, die auf der in der Energietechnik angewendete Knotenspannungsanalyse aufbauen [1].

Weiterhin ausgehend von Arbeiten von *Dommel* [2], *Heilbronner* [3] und *Heine* [4] wurde ein auf Hochspannungsprüfanlagen zugeschnittenes Verfahren entwickelt, dessen Algorithmus auf einem Bürocomputer mit einer Hauptspeicherkapazität von 64 kByte lauffähig ist. Dieses Programm gestattet die Berechnung von Schaltungen (z. B. Bild 1) mit maximal 50 Knoten und 100 Zweigen. Als Schaltelemente stehen ohmscher Widerstand, Induktivität, Kapazität, zeitabhängiger Schalter, Funkenstrecke, Gleichrichter, nichtlinearer Widerstand, nichtlineare Induktivität, Spannungsquellen, Stromquellen und idealer Übertrager zur Verfügung.

Konzentrierte lineare Schaltelemente werden durch ihre Strom-Spannungsbeziehungen für R, L und C dargestellt. Über einem Zweig zwischen dem Knoten k und dem Knoten l liegt die Spannungsdifferenz $u_k(t) - u_l(t)$ und durch den Zweig fließt der Strom $i_{kl}(t)$:

$$i_{kl}(t) = \frac{1}{R}\,(u_k(t) - u_l(t)) \tag{1}$$

$$i_{kl}(t) = i_{kl}(t - \Delta t) + \frac{1}{L}\int_{t-\Delta t}^{t} (u_k(t) - u_l(t))\,\mathrm{d}t \tag{2}$$

$$u_k(t) - u_l(t) \triangleq u_k(t - \Delta t) - u_l(t - \Delta t) + \frac{1}{C}\int_{t-\Delta t}^{t} i_{kl}(t)\,\mathrm{d}t\,. \tag{3}$$

Durch Anwendung der Trapezregel zur numerischen Integration kann für die 3 Schaltelemente der Leitwert formuliert werden:

Dipl.-Ing. *Jürgen Wolf* ist Entwicksungsingenieur im Anlagenlabor des VEB Transformatoren- und Röntgenwerk „Hermann Matern" Dresden.

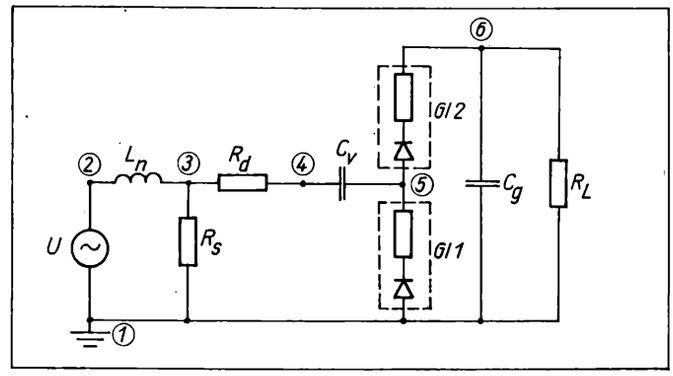


Bild 1. Gleichrichterverdopplerschaltung

Zweig	Typ		Wert
1	U	ideale Wechselspannung	U = 100 kV, 50 Hz
2	L_n	Induktivität der realen Spannungsquelle	L_n = 14 H
3	R_d	Dämpfungswiderstand	R_d = 500 Ω
4	R_s	Steuerwiderstand	R_s = 10 MΩ
5	R_l	Lastwiderstand	R_l = 10 kΩ
6	C_v	Verdopplerkapazität	C_v = 350 nF
7	C_g	Glättungskapazität	C_g = 350 nF
8, 9	*GL*	Gleichrichter	
	6 Knoten, 9 Zweige		

$$G_R = \frac{1}{R} \tag{4}$$

$$G_L = \frac{\Delta t}{2L} \tag{5}$$

$$G_C = \frac{2C}{\Delta t}\,. \tag{6}$$

Nichtlineare Schaltelemente werden durch den Leitwert dargestellt, der dem berechneten Zeitpunkt entspricht. Diskontinuierliche nichtlineare Schaltelemente, wie Gleichrichter, Funkenstrecken und Schalter, ändern ihren Leitwert, wenn ein Kriterium (z. B. die Zündspannung der Funkenstrecke) erfüllt ist. Kontinuierliche nichtlineare Schaltelemente (z. B. MOA, Trafo) erhalten zu jedem Zeitpunkt einen Leitwert zugewiesen. Strom- und Spannungsquellen werden durch Schaltelemente mit induktiver bzw. kapazitiver Charakteristik nachgebildet, denen zu jedem Zeitpunkt ein Strom- bzw. Spannungswert zugewiesen wird.

Aus den Strom- und Spannungsbeziehungen kann für alle Knoten mit ihren anliegenden Zweigen ein Gleichungssystem der Matrixform

$$|G| \cdot |u| = |i| + |I| \tag{7}$$

aufgestellt werden, wobei $|G|$ die Leitwertmatrix, $|u|$ der aktuelle Spannungsvektor, $|i|$ der aktuelle Stromvektor und $|I|$ ein Stromvektor aller kapazitiven und induktiven Zweige mit Stromanteilen des $(t - \Delta t)$-ten Schrittes ist.

Die Lösung des Gleichungssystems ergibt die Strom- und Spannungsverteilung zum Zeitpunkt t, die mit der Schrittweite Δt wiederholte Lösung ergibt dann die Strom- und Spannungsverläufe. Eine von *Heine* [4] eingeführte Iteration bei der Überprüfung nichtlinearer Schaltelemente ermöglicht das Erfassen der gegenseitigen Beeinflussung dieser Schaltelemente (z. B. bei vielstufigen Gleichrichterschaltungen).

Der gewählte Algorithmus zur Darstellung der nichtlinearen Schaltelemente ergibt einen systematisch aufgebauten Gesamtalgorithmus und dadurch ein kurzes, für den zur Verfügung stehenden Speicher geeignetes Rechenprogramm. Gegenüber [4] erfordert er aber bei jeder Leitwertänderung den erneuten Aufbau des Gleichungssystems.

2. Rechentechnische Realisierung

Das Programm NETZ zum vorliegenden mathematischen Modell wurde in der Sprache FORTRAN für den Bürocomputer Robotron A 5120 entwickelt.

Von den 64 kByte des Speichers werden etwa 27 kByte für das Programm benötigt, davon etwa 9 kByte für Variable und etwa 18 kByte für den Algorithmus. Bilder 2 und 3 zeigen den prinzi-

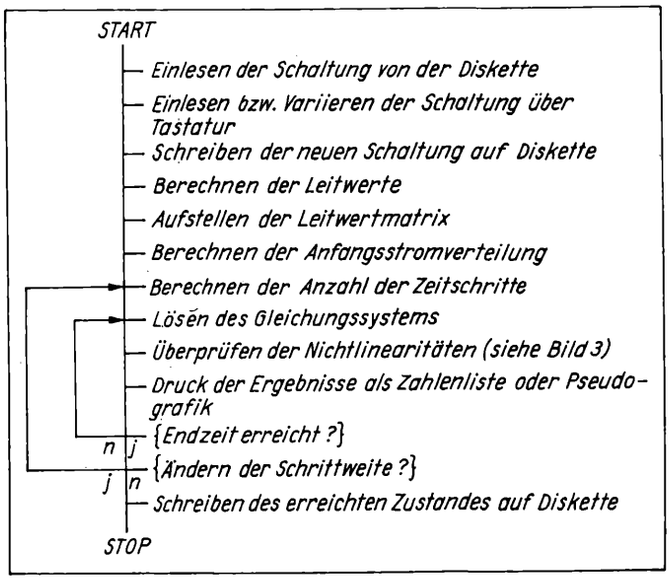


Bild 2. Prinzipieller Programmablaufplan des BC-Programmes NETZ

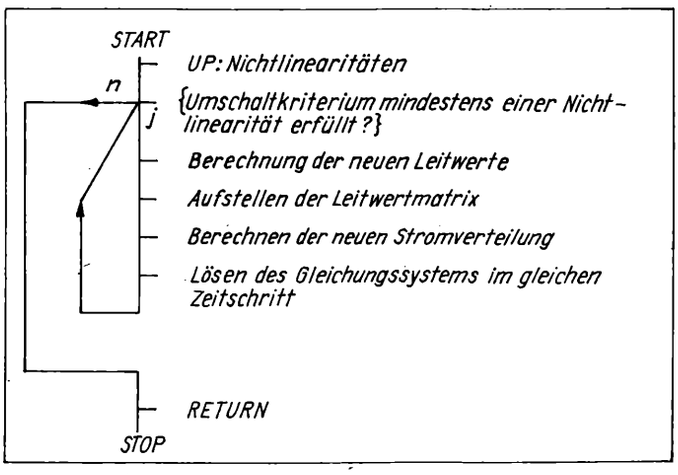


Bild 3. Prinzipieller Programmablaufplan der Überprüfung der Nichtlinearitäten

piellen Programmablauf des Gesamtprogrammes, das aus Haupt- und 16 Unterprogrammen besteht.

Die Eingabe einer zu berechnenden Schaltung erfolgt im Dialog über die Tastatur oder von der Diskette, auf der bereits eingegebene Schaltungen gespeichert sind.

Zur Vorbereitung der Rechnung werden die Eingabewerte als Kontrolle aufgelistet, die Leitwerte aller Zweige berechnet und die Leitwertmatrix aufgebaut sowie die Stromverteilung zu Beginn der Rechnung ermittelt. Die Berechnung der Strom- und Spannungsverläufe erfolgt in einer Schleife von der gewählten Anfangs- bis zur Endzeit mit der Schrittweite Δt. Zu jedem Zeitschritt wird das Gleichungssystem gelöst, die Strom- und Spannungswerte dieses Zeitschrittes gedruckt. Der Druck erfolgt als Zahlenliste von maximal zehn verschiedenen Strömen und/oder Spannungen beziehungsweise als Pseudografik von maximal fünf Größen. Ein Zeitschritt entspricht einer Zeilenschaltung. Die Strom- oder Spannungswerte werden durch unterschiedliche Zeichen an einer dem Strom oder der Spannung proportionalen Druckposition dargestellt. Ist ein Kriterium eines nichtlinearen Zweiges erfüllt, wird der Leitwert des nichtlinearen Zweiges verändert und das Gleichungssystem erneut aufgebaut (Bild 3).

Ist das Ende der Zeitschleife erreicht, kann die Berechnung mit veränderter Schrittweite Δt fortgesetzt werden. Nach Abschluß der Berechnung der Strom- und Spannungsverläufe können die erreichten Zustände gespeichert werden. Die Rechnung kann dann zu einem späteren Zeitpunkt fortgesetzt werden.

3. Anwendungsbeispiel

Die Anwendung des Programmes NETZ soll an dem Beispiel von Bild 1 demonstriert und der Aufladevorgang der Gleichspannungsverdopplerschaltung nach *Greinacher* berechnet werden. Die Induktivität L_n stellt die vereinfachte Ersatzschaltung des Hochspannungstransformators dar. Die Gleichrichter *GL 1* und *GL 2* haben eine Schwellspannung von 0,5 kV und im Leitzustand durch in Reihe geschaltete Widerstände einen Widerstandswert von 1 kΩ.

Im Bild 1 sind die Bezeichnung der Knoten und die Zweignummern angegeben. Bild 4 zeigt den Rechnerausdruck mit „den Eingabewerten und pseudografischer Darstellung ausgewählter Strom- und Spannungsverläufe. Die Verläufe, die durch eine Folge von Zeichen dargestellt werden, sind zum besseren Erkennen manuell nachgezeichnet. Es sind die Wechselspannung, die Gleichspannung, die durch den Belastungswiderstand einen Ripple aufweist, sowie die Ströme durch *GL 1* und *GL 2* dargestellt.

Die Rechenzeit für dieses Beispiel betrug 60 s.

```
*** N E T Z ***

T-ANF: .0000E+01
DEL-T: .1000E+01
DI    : 1

KNOTEN: 6
ZWEIGE: 9

DIM. U: kV
DIM. I:A

KNOTEN

NAME      U-ANF.        DR
  2       0.0000         1
  3       0.0000         0
  4       0.0000         0
  5       0.0000         0
  6       0.0000         1

ZWEIGE
NR    NAME   TYP   I-ANF.    DR   WERT A      WERT B      WERT C
1     2 1    U1    0.0000    0    .1000E+03   .5000E+02   .0000E+01
2     2 3    L     0.0000    0    .1400E+02   .0000E+01   .0000E+01
3     3 4    R     0.0000    0    .5000E+03   .0000E+01   .0000E+01
4     3 1    R     0.0000    0    .1000E+08   .0000E+01   .0000E+01
5     6 1    R     0.0000    0    .1000E+06   .0000E+01   .0000E+01
6     4 5    C     0.0000    0    .3500E—06   .0000E+01   .0000E+01
7     6 1    C     0.0000    0    .3500E—06   .0000E+01   .0000E+01
8     1 5    GL    0.0000    1    .5000E+00   .1000E+04   .0000E+01
9     5 6    GL    0.0000    1    .5000E+00   .1000E+04   .0000E+01

      T        U2 1      U6 1      I1 5      I5 6
      ms       * 1.0     + 1.0     × 10.0    o 10.0
```

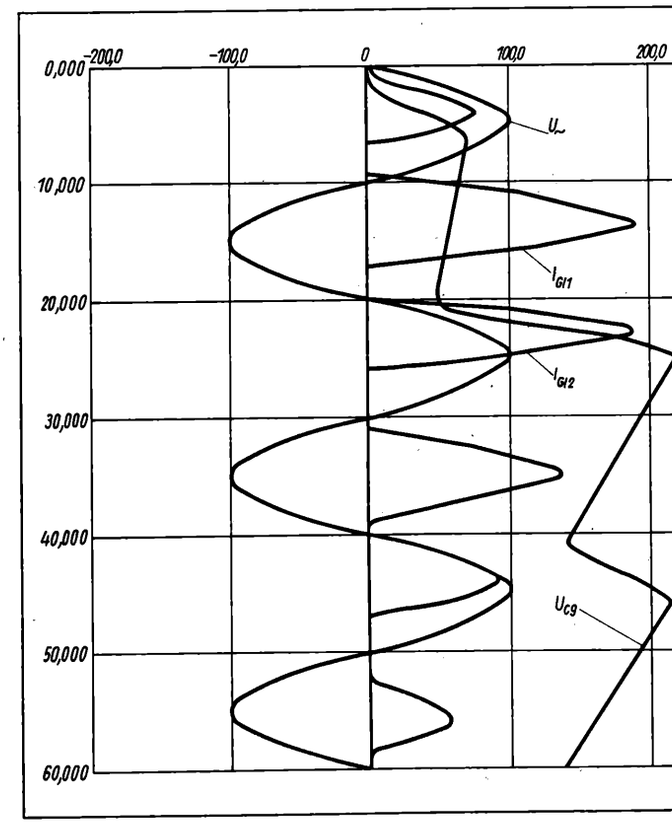


Bild 4. Rechnerausdruck mit Grafik:
Strom- und Spannungsverläufe einer Gleichrichterverdopplerschaltung (Rechnerausdruck aus drucktechnischen Gründen nicht im Original wiedergegeben)

Statistische Auswertung mit dem Bürocomputer: Ermittlung und Darstellung empirischer Normalverteilungen

W. Hauschild, KDT; J. Wolf, KDT; Dresden

Mitteilung aus dem VEB Transformatoren- und Röntgenwerk „Hermann Matern" Dresden

Die auswertende Statistik [1] ist mit aufwendigen Rechenoperationen verbunden, wobei feste Algorithmen immer wieder anzuwenden sind. Verminderungen des Aufwandes bringt auch hier der Einsatz von Digitalrechnern, wobei ursprünglich die von Meß- und Steuersystemen [2] z. B. auf Lochband erfaßten Daten off-line mit Großrechnern verarbeitet wurden [3]. Vorteilhafter sind aber arbeitsplatzorientierte Rechner mit ihrer größeren Flexibilität, für die auch bereits Programme vorliegen [4]. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, solche Kleinrechner on-line mit einem Meß- und Steuersystem zu betreiben, dadurch Teilauswertungen schon während des Versuchs vorliegen zu haben und so den weiteren Versuchsablauf optimieren zu können. Eine dem Ingenieur gemäße statistische Auswertung erfordert die Veranschaulichung der Ergebnisse in grafischer Form. Diesem Teilproblem widmet sich der vorliegende Beitrag, wobei nur auf den am häufigsten benutzten Verteilungstyp, die Normalverteilung, eingegangen wird. Für andere Verteilungsfunktionen kann das Rechenprogramm modifiziert werden.
Das Beispiel wird aus der Hochspannungstechnik gewählt, weil die dort untersuchten Größen durchweg stochastischen Charakter tragen. Auch ist das Rechenprogramm im Zusammenhang mit einer hochspannungstechnischen Aufgabenstellung [5] entstanden. Der angedeutete Trend von rechnergestützter Auswertung und Versuchsautomatisierung besitzt sowohl für den experimentell arbeitenden Hochspannungstechniker als auch für die Entwicklung von Meß- und Steuersystemen für Hochspannungs-Prüfanlagen [6] besondere Bedeutung, jedoch können ähnliche Entwicklungen auch auf anderen Spezialgebieten der Elektrotechnik beobachtet werden.

1. Grundlagen

Im unmittelbaren Kontakt mit dem Experiment interessiert für weitere Entscheidungen zunächst die statistische Unabhängigkeit der Einzelergebnisse (Realisierungen X_I) in der Meßreihe (Stichprobe) voneinander, da dies Voraussetzung für jede statistische Auswertung ist [1]. Danach muß geprüft werden, durch welches Verteilungsgesetz die Realisierungen (im vorliegenden Fall im Spannungssteigerungsversuch [1] gewonnene Durchschlagspannungen) beschrieben werden können. Für beide Teilprobleme sind grafische Schnellbewertungen hilfreich.

1.1. Grafische Darstellung der Urliste

Die Urliste umfaßt alle Realisierungen in der Reihenfolge ihres Auftretens. Um die Unabhängigkeit bewerten zu können, müssen $N \geqq 10$ Realisierungen vorliegen. Sie werden über ihrer Rangzahl $I\,(I = 1 \cdots N)$ grafisch dargestellt und mit dem arithmetischen Mittelwert

$$M = \frac{1}{N} \sum_{I=1}^{N} X_I \tag{1}$$

verglichen. Zur besseren Beurteilung der Grafik werden noch die mit der mittleren quadratischen Abweichung

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{I=1}^{N} (X_I - M)^2} \tag{2}$$

bestimmten Schranke $M \pm S$ und $M \pm 2S$ eingezeichnet. Die Unabhängigkeit der Realisierungen in der Stichprobe erfordert, daß sie ausreichend viele Wechsel (Iterationen) $X_I < M$ nach $X_I > M$ (oder umgekehrt) besitzen und daß kein Trend vorliegt. Ein Trend läge vor, wenn die Realisierungen X_I steigende, fallende oder periodisch schwankende Tendenz haben. Die grafische Bewertung kann durch Unabhängigkeitstests [1] ergänzt werden.
Läßt die Grafik Unabhängigkeit erkennen, kann sich die weitere statistische Bearbeitung anschließen. Ist die Stichprobe abhängig, muß die Meßreihe wiederholt werden. Werden Unabhängigkeiten nur für einen Teil der Stichprobe an ihrem Anfang (Konditionierung) oder Ende festgestellt, so können diese Realisierungen eliminiert und die weiteren statistischen Auswertungen für die verkleinerte (bereinigte) Stichprobe durchgeführt werden.

1.2. Empirische Verteilungsfunktion im Wahrscheinlichkeitsnetz

Die Darstellung einer empirischen Verteilungsfunktion erfolgt vorteilhaft in einem Wahrscheinlichkeitsnetz, in dem der dem Netz zugrunde liegende Verteilungstyp als Gerade erscheint. Aus der Abweichung der einzelnen Realisierungen von der Gerade kann geschlußfolgert werden, ob der Verteilungstyp geeignet ist, die empirische Verteilungsfunktion zu approximieren.
Ein Wahrscheinlichkeitsnetz wird so konstruiert, daß die Ordinate nach der Umkehrfunktion der betrachteten Verteilung, im vorliegenden Fall der Normalverteilung, geteilt ist (Abszisse linear geteilt). Die Realisierungen X werden der Größe nach sortiert (primäre Verteilungstafel [1], $J = 1 \cdots N$) und jeder wird nach

$$Z(X_J) = \frac{A\,(X \leqq X_J)}{N+1} \tag{3}$$

($A\,(X \leqq X_J)$ ist die Anzahl der Realisierungen, die kleiner/gleich dem betrachteten Wert X_J sind) eine relative Summenhäufigkeit $Z(X_J)$ zugeordnet. Im Wahrscheinlichkeitsnetz wird zu jeder einzelnen Realisierung die Summenhäufigkeit eingezeichnet und durch die N Punkte ein Polygonenzug gelegt. Außerdem werden bei $Z(M) = 0{,}50$; $Z(M-S) = 0{,}16$ und $Z(M+S) = 0{,}84$ drei Punkte markiert, durch die die am besten angepaßte Normalverteilung ($\mu^* = M$; $\sigma^* = S$) als Gerade gelegt wird. Kann der Polygonenzug durch die Gerade angenähert werden, liegt eine Normalverteilung vor. Größere Abweichungen deuten auf einen anderen Verteilungstyp oder Mischverteilungen [1] hin.

2. Rechenprogramme

Die beiden folgenden Programme sind in BASIC geschrieben und laufen unter dem Betriebssystem UDOS auf dem Bürocomputer A 5120 mit Seriendrucker SD 1152 oder SD 1157. Mit ihnen können

4. Zusammenfassung

Zum Schaltungsentwurf von Hochspannungsprüfanlagen eignen sich besonders Rechenprogramme, deren allgemeine Anwendbarkeit eine Anpassung an unterschiedliche Prüfanlagenschaltungen ermöglichen.
Eine effektive Anwendung ist durch die Benutzung arbeitsplatzorientierter Rechner gegeben, mit denen der Ingenieur im Dialog arbeiten kann.
Es wird ein Netzanalyseprogramm für den Bürocomputer A 5120 beschrieben, das die Berechnung von Schaltanlagen mit 50 Knoten und 100 Zweigen unter Einbeziehung nichtlinearer Schaltelemente ermöglicht und bereits erfolgreich für den Entwurf von Prüfanlagen eingesetzt wurde.

Literatur

[1] *Storch, H.:* Ein mathematisches Modell zur Berechnung beliebiger symmetrischer und unsymmetrischer Betriebszustände in elektrischen Energieversorgungsanlagen. Dissertation TH Ilmenau 1970
[2] *Dommel, H.:* Berechnung elektrischer Ausgleichsvorgänge in elektrischen Netzwerken mit Digitalrechnern. Bull SEV 60 (1969) 12, S. 538—548
[3] *Heilbronner, F.:* Durchzündverhalten und Spannungsaufbau mehrstufiger Stoßgeneratoren. Dissertation TH München 1970
[4] *Heine, F.:* Beitrag zur digitalen Berechnung stationärer und dynamischer Vorgänge in Hochspannungsprüfanlagen. Dissertation TU Dresden 1981

EA 5674

Dr. sc. techn. *Wolfgang Hauschild* ist Leiter, Dipl.-Ing. *Jürgen Wolf* ist Entwicklungsingenieur im Anlagenlabor des VEB Transformatoren- und Röntgenwerk „Hermann Matern" Dresden.

Meßreihen ausgewertet werden, die als Dateien auf Diskette vorliegen müssen und bei N Realisierungen $N + 1$ REAL-Zahlen enthalten. Die erste Zahl ist die Anzahl der Realisierungen N, die zweite bis $N + 1$te Zahl sind die Realisierungen $X(I)$. Die Datei ist unter einem Namen ansprechbar, der maximal 20 alphanumerische Zeichen lang sein darf.

2.1. Grafische Darstellung der Urliste

Mit diesem Programm werden die Realisierungen in der Reihenfolge ihres Auftretens zunächst aufgelistet. Die Liste wird durch Angabe des Mittelwertes M und der mittleren quadratischen Abweichung S beendet. Anschließend erfolgt eine pseudografische Darstellung der Urliste, in der die Werte M, $M-S$, $M-2S$, $M+S$, $M+2S$ als Linie enthalten sind.

Bild 1 zeigt den Programmtext:

Zeile 110 fordert die Eingabe des Dateinamens. Auf den Zeilen 500 bis 670 werden die N Realisierungen in den Arbeitsspeicher eingelesen, der Mittelwert M nach (1) und die mittlere quadratischo Abweichung S nach (2) berechnet.

Die Zeilen 700 bis 890 bewirken den numerischen Druck von je 10 Realisierungen auf eine Druckzeile. Der pseudografische Druck wird auf den nachfolgenden Zeilen 940 bis 1080 vorbereitet.

Jeder Realisierung ist eine Druckzeile auf der Abszisse zugeordnet, ihrem Wert eine entsprechende Druckposition in Ordinatenrichtung.

Die Darstellbreite der Urliste umfaßt den Bereich von $M-2S$ bis $M+2S$ (Zeile 1005). Wenn $X_{min} < M-2S$ oder $X_{max} > M+2S$ ist, liegt der Darstellbereich zwischen 0,98 X_{min} und 1,02 X_{max} (Zeile 1010). Ist der Mittelwert $M > 10$, wird die Abszisse nur mit ganzen Zahlen eingerichtet (Zeile 1020). Die Schleife (Zeilen 1030 bis 1060) bewirkt den Druck der Ordinatenwerte, das Unterprogramm (ab Zeile 2000) den Druck der Ordinatenlinie.

In einer Schleife, die N-mal durchlaufen wird, werden alle Realisierungen gedruckt (Zeilen 1090 bis 1280) und nachträglich mit Hand zu einem Polygonzug verbunden.

Bild 1. BASIC-Programm zur grafischen Darstellung der Urliste (Rechnerausdruck aus drucktechnischen Gründen nicht im Original wiedergegeben)

```
 10 REM          STATISTIK URLISTE
 40 REM
 50 FILE #1;"$PRINTER"
 60 DIM A$(8),B$(20),C$(101)
 70 LET A$="###D.DDD"
 80 SYSTEM "LINELEN",132
 90 PRINT "BASIC-PROGRAMM 'STATISTIK-URLISTE', VERSION 9.12.85"
100 PRINT
110 INPUT "DATEINAME :"B$
120 PRINT
130 PRINT #1;"       *** STATISIK-URLISTE ***       ",B$
140 PRINT #1;
500 REM--------EINLESEN DER WERTE VON DER DISKETTE
510 FILE #2;B$
520 READ #2;N
530 DIM X(N)
540 FOR A=1 TO N
550    READ #2;X(A)
560 NEXT A
570 REM---------BERECHNEN DES MITTELWERTES
580 LET M=0,S=0
590 FOR A=1 TO N
600    LET M=M+X(A)
610 NEXT A
620 LET M=M/N
630 REM---------BERECHNEN DER MITTLEREN QUADRATISCHEN ABWEICHUNG
640 FOR A=1 TO N
650    LET S=S+(X(A)-M)^2
660 NEXT A
670 LET S=SQR(S/(N-1))
700 REM---------DRUCK DER MESSWERTE
720 FOR A=10 TO N STEP 10
750 '  PRINT #1; USING A$,X(A-9);TAB(11); USING A$,X(A-8);TAB(21); USING A$,X(A-7);TAB(31); USING A$,X(A-6);
760    PRINT #1;TAB(41); USING A$,X(A-5);TAB(51); USING A$,X(A-4);TAB(61); USING A$,X(A-3);
770    PRINT #1;TAB(71); USING A$,X(A-2);TAB(81); USING A$,X(A-1);TAB(91); USING A$,X(A)
800 NEXT A
810 LET C=N-10*(N/10),A=A-10
840 FOR D=0 TO C-1
850    PRINT #1;TAB(10*D+1); USING A$,X(A+D+1);
860 NEXT D
880 PRINT #1;
890 PRINT #1;
900 REM---------DRUCK VON MITTELWERT UND MITTLERER QUADRATISCHER ABWEICHUNG
910 PRINT #1;"M="; USING A$,M;" S="; USING A$,S
920 PRINT #1;TAB(86);"Durchschlagspannung X/kV"
930 PRINT #1;
940 REM---------SUCHEN DES KLEINSTEN UND GROESSTEN WERTES
950 LET X1=0,X2=1.000000000000E+090
960 FOR A=1 TO N
970    IF X(A)<X2 THEN LET X2=X(A)
980    IF X(A)>X1 THEN LET X1=X(A)
990 NEXT A
1000 REM---------FESTLEGEN DER DARSTELLBREITE DER URLISTE
1005 LET M1=M+2*S,M2=M-2*S
1010 IF X1>M1 THEN LET M1=1.02*X1
1015 IF X2<M2 THEN LET M2=.98*X2
1020 IF M>10 THEN LET M1=INT(M1),M2=INT(M2)
1030 FOR A=1 TO 11
```

```
1040    IF (M1—M2)>10 THEN PRINT #1; USING "########D",M2+(A—1)* (M1—M2)/10;
1050    ELSE PRINT #1; USING "#######D.D",M2+(A—1)*(M1—M2)/10;
1060 NEXT A
1070 PRINT #1;
1080 GOSUB 2010
1090 REM————DRUCK DER URLISTE
1100 LET C=0
1110 REM————LOESCHEN DES ZEILENSPEICHERS
1120 FOR A=1 TO N
1130    FOR B=1 TO 101
1140       LET C$(B,B)=" "
1150    NEXT B
1160    REM————LINIE MIN, MAX, MITTELWERT, MITTLERE QUADRATISCHE ABWEICHUNG
1170    LET P=1+(M—M2)/(M1—M2)*100,C$(P,P)="|"
1180    LET P=1+(M—S—M2)/(M1—M2)*100,C$(P,P)="|"
1185    LET P=1+(M—2*S—M2)/(M1—M2)*100,C$(P,P)="|"
1190    LET P=1+(M+S—M2)/(M1—M2)*100,C$(P,P)="|"
1195    LET P=1+(M+2*S—M2)/(M1—M2)*100,C$(P,P)="|"
1200    IF C=9 THEN LET (C$(1,1)="—",C$(101,101)="—"
1210    ELSE LET C$(1,1)="|",C$(101,101)="|"
1220    REM————EINSETZEN DES WERTES IN DEN ZEILENSPEICHER
1230    LET P=1+(X(A)—M2)/(M1—M2)*100,C$(P,P)="+"
1240    IF C=9 THEN PRINT #1;A;
1250    PRINT #1;TAB(10);C$
1260    LET C=C+1
1270    IF C=10 THEN LET C=0
1280 NEXT A
1285 GOSUB 2010
1290 PRINT #1;"N";TAB(10+(M—2*S—M2)/(M1—M2)*100);"M—2S";
1300 PRINT #1;TAB(10+(M—S—M2)/(M1—M2)*100);"M—S";
1310 PRINT #1;TAB(10+(M—M2)/(M1—M2)*100);"M";
1320 PRINT #1;TAB(10+(M+S—M2)/(M1—M2)*100);"M+S";
1330 PRINT #1;TAB(10+(M+2*S—M2)/(M1—M2)*100);"M+2S"
1340 PRINT #1;"<12>"
1350 END
2000 REM————UP: DRUCK DER 1. UND LETZTEN ZEILE
2010 PRINT #1;TAB(10);"+";
2020 FOR A=1 TO 10
2030    PRINT #1;"————+";
2040 NEXT A
2050 PRINT #1;
2060 RETURN
```

Tafel 1. Rechnerausdruck zu Bild 2

*** STATISTIK-URLISTE ***					D20.3.85				
911.000	958.000	895.000	935.000	1095.000	1096.000	1126.000	1115.000	1200.000	1098.000
1193.000	1202.000	1139.000	1138.000	1180.000	1168.000	1160.000	1154.000	1203.000	1143.000
1191.000	1205.000	1202.000	1187.000	1184.000	1088.000	1205.000	1183.000	1205.000	1198.000
1205.000	1205.000	1205.000	1190.000	1202.000	1246.000	1205.000	1201.000	1103.000	1206.000
1206.000	1182.000	1191.000	1191.000	1205.000	1182.000	1205.000	1204.000	1205.000	1111.000

Tafel 2. Rechnerausdruck zu Bild 3

*** STATISTIK-URLISTE ***				D30.4.85					
655.000	684.000	666.000	644.000	662.000	660.000	684.000	684.000	653.000	655.000
646.000	664.000	691.000	643.000	680.000	687.000	653.000	648.000	680.000	668.000
657.000	646.000	634.000	632.000	675.000	666.000	696.000	650.000	682.000	662.000
677.000	653.000	632.000	657.000	675.000	634.000	677.000	703.000	612.000	677.000
655.000	662.000	689.000	634.000	678.000	632.000	612.000	655.000	644.000	680.000

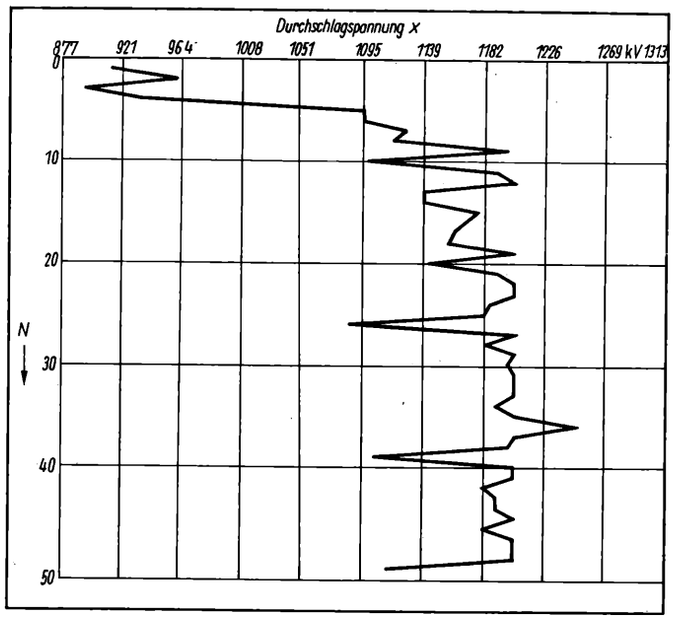


Bild 2. Grafische Urliste einer abhängigen Stichprobe

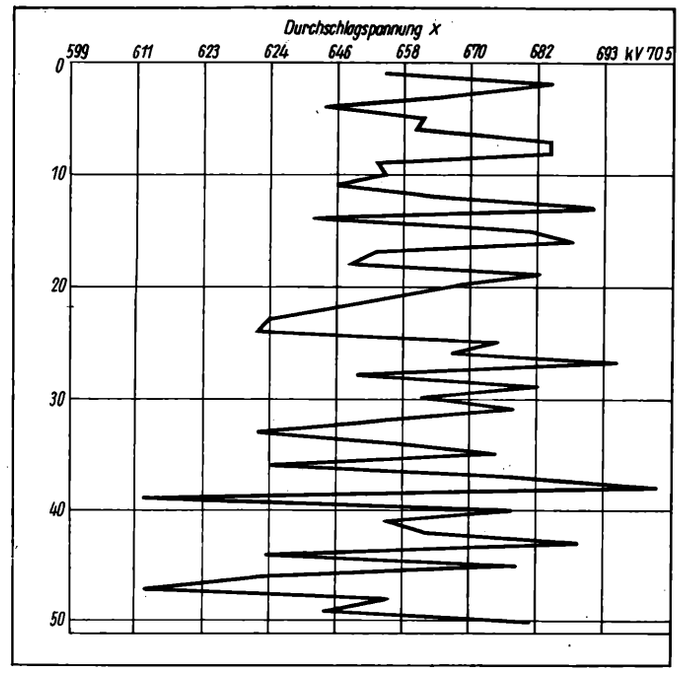


Bild 3. Grafische Urliste einer unabhängigen Stichprobe

Als Beispiel zeigt Bild 2 eine abhängige Stichprobe, bei der die ersten zehn Realisierungen eine steigende Tendenz haben, während Bild 3 eine unabhängige Stichprobe repräsentiert.

2.2. Empirische Verteilungsfunktion im Wahrscheinlichkeitsnetz

Mit diesem Programm wird die empirische Verteilungsfunktion pseudografisch in ein Wahrscheinlichkeitsnetz gedruckt. Der Druck kann wahlweise auf Wahrscheinlichkeitspapier (Schäfers Feinpapier Blatt Nr. 500) oder auf weißes Papier erfolgen. Die Pseudografik ist so aufgebaut, daß wegen der Nichtlinearität der Ordinate durch die Position eines Druckzeichens jeweils ein unterschiedlich breiter Bereich der relativen Summenhäufigkeit dargestellt wird. In den DATA-Anweisungen (Zeilen 100 bis 140) sind die einem Druckzeichen entsprechenden Grenzen der relativen Summenhäufigkeit enthalten, d.h., alle Realisierungen, deren relativen Summenhäufigkeiten zwischen die gleichen Zahlen der DATA-Anweisung fallen, werden durch ein Druckzeichen „+" auf der gleichen Druckposition dargestellt.

In Z (X)-Richtung (Wahrscheinlichkeitsachse) erhält jede Realisierung bei $N < 32$ ihr eigenes Druckzeichen. Bei $N \geqq 32$ erzwingt der Drucker, daß zumindest im mittleren Bereich der Grafik mehrere Realisierungen durch nur ein Druckzeichen repräsentiert werden.

In X-Richtung (Merkmalsachse) sind durch die Zeilenschaltung des Druckers auch nur bestimmte Werte darstellbar, eine Einteilung in K Druckklassen, die einen gewissen Informationsverlust bedeuten kann [1], ist damit erforderlich. Alle Realisierungen, die in eine Druckklasse fallen, werden auf einer Druckzeile dargestellt. Die pseudografische Darstellung der empirischen Verteilungsfunktion wird dann mit $(X_{max} - X_{min})/K$ Zeilenschaltungen gedruckt. Die Druckklassenbreite muß entsprechend der zur Verfügung stehenden Papierlänge gewählt werden.

Bild 4 zeigt den Programmtext:

Das Einlesen der Realisierungen, Berechnen von M und S erfolgt in gleicher Weise wie in Punkt 2.1.

Die Zeilen 700 bis 750 bewirken das Sortieren der Realisierungen der Größe nach.

In einer Schleife (Zeilen 1020 bis 1170), die so oft durchlaufen wird, wie Druckklassen vorhanden sind, werden die sortierten Realisierungen danach überprüft, ob ihr Wert X in die jeweilige Druckklasse fällt. Ist diese Bedingung erfüllt (Zeile 1040), wird mit Zeile 1050 die relative Summenhäufigkeit nach (3) berechnet. In dem Unterprogramm ab Zeile 2000 wird mit Hilfe der DATA-Anweisung die Druckposition ermittelt und auf diese Position im Zeichenkettenfeld $C$$ ein „+" eingetragen. Fällt die Realisierung X in die folgende Druckklasse, wird die bisherige Druckklasse gedruckt (Zeilen 1140, 1150) und die nächste Druckklasse vorbereitet (Unterprogramm Zeile 5000). Die Werte $M-S$, M und $M+S$ (Gln. (1) und (2)) werden in die Stichprobe eingeordnet und durch Zeichen "*„ ausgedruckt (Zeilen 1110 bis 1130).

Die Zeilen 1200 und 1210 bewirken ein zweimaliges FORM-FEED und damit ein Auslaufen des Wahrscheinlichkeitspapiers aus dem Drucker.

Bild 5 zeigt die empirische Verteilungsfunktion der Meßreihe von Bild 3. Die Realisierungen X sind von Hand durch einen Polygonenzug verbunden, durch die Punkte $M-S$, M, $M+S$ wird die aus der Parameterschätzung ermittelte empirische Verteilungsfunktion eingetragen. Der Abstand zwischen Polygonenzug und Gerade ist ein Maß für die Güte der Approximation durch die Normalverteilung.

Bild 4. BASIC-Programm zur grafischen Darstellung der empirischen Verteilungsfunktion (Rechnerausdruck ist aus drucktechnischen Gründen nicht im Original wiedergegeben; s. S. 235 und 236)

Bild 5. Empirische Verteilungsfunktion der Stichprobe nach Bild 3

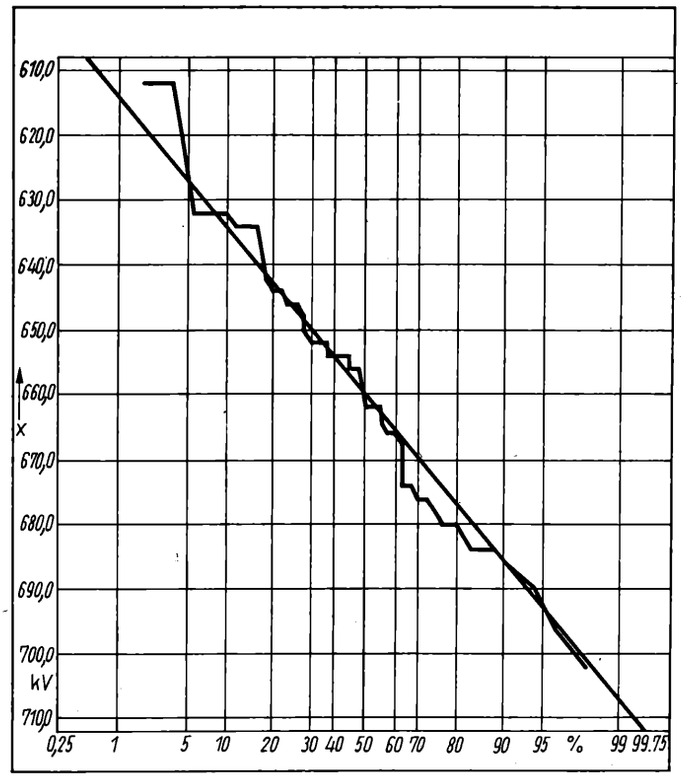


Bild 4. Basic-Programm zur grafischen Darstellung der empirischen Verteilungsfunktion

```
 10 REM              EMPIRISCHE VERTEILUNGSFUNKTION IM
 20 REM               WAHRSCHEINLICHKEITSNETZ DER NORMALVERTEILUNG
 40 REM
 50 FILE #1;"$PRINTER"
 60 DIM A$(10),B$(20),C$(81)
 70 LET A$="#####D.D##"
 80 DIM M(76),N(13)
 90 SYSTEM "LINELEN",132
100 DATA0,.5,.6,.7,.8,1,1.2,1.5,1.8,2.1,2.5,2.9,3.4,4,4.7,5.4,6.2,7.2,8.2,9.3
110 DATA 10.6,11.9,13.4,15,16.7,18.6,20.6,22.7,24.9,27.2,29.6,32.1,34.7,37.4,40.1,42.9,45.7,48.55,51.45
120 DATA54.3,57.1,59.9,62.6,65.3,67.9,70.4,72.8,75.1,77.3,79.4,81.4,83.3,85,86.6,88.1,89.4,90.7
130 DATA91.8,92.8,93.8,94.6,95.3,96,96.6,97.1,97.5,97.9,98.2,98.5,98.8,99,99.2,99.3
140 DATA99.4,99.5,100
150 FOR A=1 TO 76
160     READ M(A)
170 NEXT A
180 DATA1,5,10,20,30,40,50,60,70,80,90,95,99
190 FOR A=1 TO 13
200     READ N(A)
210 NEXT A
220 PRINT "BASIC-PROGRAMM 'STATISTIK-WAHRSCHEINLICHKEITSNETZ',VERSION 9.12.85"
230 PRINT
240 INPUT "DATEINAME:"B$
250 PRINT #1;"    *** EMPIRISCHE VERTEILUNGSFUNKTION IM WAHRSCHEINLICHKEITSNETZ DER NORMALVER-
    TEILUNG ***  ";B$
260 PRINT #1;
270 PRINT #1;
280 PRINT #1;
290 PRINT
300 PRINT
500 REM--------EINLESEN DER WERTE VON DER DISKETTE
510 FILE #2;B$
520 READ #2;N
530 DIM X(N)
540 FOR A=1 TO N
550     READ #2;X(A)
560 NEXT A
570 REM---------BERECHNEN DES MITTELWERTES
580 LET M=0, S=0
590 FOR A=1 TO N
600     LET M=M+X(A)
610 NEXT A
620 LET M=M/N
630 REM---------BERECHNEN DER MITTLEREN QUADRATISCHEN ABWEICHUNG
640 FOR A=1 TO N
650     LET S=S+(X(A)—M)^2
660 NEXT A
670 LET S=SQR(S/(N—1))
680 LET M1=M—S,M2=M+S
700 REM---------SORTIEREN DER WERTE
710 FOR A=1 TO N—1
720     FOR B=1 TO N—A
730         IF X(B)>X(B+1) THEN LET C=X(B),X(B)=X(B+1),X(B+1)=C
740     NEXT B
750 NEXT A
800 REM---------EINGABE DER RANDWERTE DER GRAFIK
810 PRINT "MIN=";X(1),"MAX"=;X(N),"X<126>="; USING A$,M,"S="; USING A$,S
820 PRINT
830 INPUT "MIN. WERT, MAX. WERT :"U1,U2
840 PRINT
850 INPUT "DRUCKKLASSENEINTEILUNG (X/RASTER):"K
860 PRINT
910 PRINT #1;
920 PRINT #1;
930 PRINT #1;TAB(89);"Z(X)/%"
940 GOSUB 4010
950 GOSUB 3010
1000 REM---------DRUCK DER GRAFIKZEILEN, C=ZEILENNUMMER
1010 LET A=1
1020 FOR C=0 TO (U2—U1)/K
1025     GOSUB 5010
1030     LET B1=U1+K*(C—.5),B2=U1+K*(C+.5)
1040     IF X(A)>B2 THEN 1110
1050     LET Z=100*A/(N+1)
```

```
1060    GOSUB 2020
1070    LET C$(P,P)="+"
1080    IF A<N THEN LET A=A+1
1090    ELSE LET X(N)=1.000000000000E+090
1100    GOTO 1040
1110    IF M1>=B1&M1<B2 THEN LET C$(27,27)="*"
1120    IF M>=B1&M<B2 THEN LET C$(41,41)="*"
1130    IF M2>=B1&M2<B2 THEN LET C$(55,55)="*"
1140    IF (INT(C/5)—C/5)=0 THEN PRINT #1; USING A$,U1+C*K;C$
1150    ELSE PRINT #1;TAB(11);C$
1170 NEXT C
1180 GOSUB 3010
1190 GOSUB 4010
1195 PRINT #1;"X/kV"
1200 PRINT #1;"<12>"
1210 PRINT #1;"<12>"
1220 END
2000 REM--------UP: ZUWEISUNG DER DRUCKPOSITION ZU DEN REL. HAEUFIGKEITEN
2010 REM--------SORTIEREN, GROB IN 5-ER-GRUPPEN
2020 FOR D=5 TO 70 STEP 5
2030    IF Z<M(D+1) THE 2070
2040 NEXT D
2050 LET D=75
2060 REM--------SORTIEREN INNERHALB DER 5-ER-GRUPPEN
2070 FOR B=D—4 TO D
2080    IF Z>=M(B)&Z<M(B+1) THEN DO
2090       LET P=B+3
2100       RETURN
2110    DOEND
2120 NEXT B
2130 RETURN
3000 REM--------UP: DRUCK DER 1. UND LETZTE ZEILE
3010 FOR A=1 TO 81
3020    LET C$(A,A)="—"
3030 NEXT A
3040 LET C$(1,1)="+",C$(81,81)="+"
3050 FOR A=1 TO 13
3060    LET Z=N(A)
3070    GOSUB 2020
3080    LET C$(P,P)="+"
3090 NEXT A
3100 PRINT #1;TAB(11);C$
3110 RETURN
4000 REM--------UP: DRUCK DER ORDINATENWERTE
4010 PRINT #1;TAB(10);"0.25";
4020 FOR A=1 TO 13
4030   LET Z=N(A)
4040    GOSUB 2020
4050    PRINT #1;TAB(P+9); USING "##",N(A);
4060 NEXT A
4070 PRINT #1;TAB(90);"99.75"
4080 RETURN
5000 REM--------UP: VORBEREITEN EINER ZEILE
5010 FOR D=1 TO 81
5020    LET C$(D,D)="  "
5030 NEXT D
5040 LET C$(1,1)="+", C$(27,27)="|", C$(41,41)="|", C$(55,55)="|", C$(81,81)="+"
5050 RETURN
```

3. Zusammenfassung und Ausblick

Es wird ein BASIC-Programm für den Bürocomputer A 5120 beschrieben, mit dessen Hilfe Meßreihen (Stichproben) statistisch ausgewertet und grafisch dargestellt werden können. Diese Auswertung erfolgt nach der Bewertung der Unabhängigkeit der Stichprobe auf der Basis der Normalverteilung.

Für andere Verteilungstypen (z. B. Weibull- und Doppelexponentialverteilung [1]) kann analog verfahren werden, wenn das entsprechende Wahrscheinlichkeitsnetz eingegeben wird (Bild 4: Zeilen 100 bis 140) und die zugehörigen Parameter anstelle von Mittelwert M und mittlerer quadratischer Abweichung S (Zeilen 570 bis 680) berechnet werden.

Literatur

[1] *Hauschild, W.; Mosch, W.:* Statistik für Elektrotechniker. Berlin: VEB Verlag Technik 1984

[2] *Erdmann, D.; Mittmann, A.:* Gerätesystem für den halb- und vollautomatischen Betrieb von Hochspannungs-Prüfanlagen. ELEKTRIE, Berlin 36 (1981) 7, S. 353—357

[3] *Hauschild, W.; Köppe, R.:* Statistische Auswertung hochspannungstechnischer Messungen am Digitalrechner. ELTRA-Fortschrittsbericht 1973 (IPH Berlin); Heft 7

[4] *Bunzel, E.;* u. a.: Ausgleich von Versuchs- und Meßdaten am Beispiel elektrischer Maschinen. ELEKTRIE, Berlin 39 (1985) 7, S. 271—273

[5] *Schufft, W.; Beyer, J.:* Messung der Durchschlagspannung an einer 2,7-m-Teller-Segmentkugel gegen Ebene unter Freiluftbedingungen. ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 6, S. 220—222

[6] *Bachmann, H.; Hauschild, W.:* Stand und Trend bei Automatisierung von Hochspannungsprüfprozessen. VI. Wiss. Konferenz der Energiewirtschaft. IH Zittau Session 6, 1982, S. 7—13

EA 5673

BUCHER

Neue Reihe aus unserem Verlag

Technische Informatik

Bedingt durch das breit angelegte und oft auch strukturverändernde Mikroelektronikprogramm (Hardware/Software) der DDR hat das Interesse an den Themen zur technischen Informatik beträchtlich zugenommen. Daher soll mit dieser neuen Fachbuchreihe einem breiten Leserkreis von Ingenieuren, Naturwissenschaftlern und Ökonomen anwendungsbezogenes Wissen zur Informatik vermittelt werden. Diese Reihe wendet sich in erster Linie an die Fachkader in Industrie, Verkehrswesen, Verwaltung und Handel, die sich mit den jetzt gegebenen Mitteln und Möglichkeiten der Informationsverarbeitungstechnik vertraut machen müssen. Für die Praxiskader besteht ein großer Nachholebedarf nicht nur an Grundlagenliteratur, sondern auch an anwendungsorientierten Nachschlagewerken. In allen Publikationen muß der Anwendungsaspekt berücksichtigt werden.

Um das zu erwartende und zum Teil schon vorhandene Informationsbedürfnis zu befriedigen und nun volkswirtschaftlich relevante Zielstellungen möglichst effektiv zu unterstützen, werden vorzugsweise Themen mit hoher Auflage in die Reihe aufgenommen. Nicht berücksichtigt wird der Hobbycomputerbereich (technische Spiele). Ausschlaggebend ist immer die Anwendbarkeit in der Technik. Da sich die Reihe an Praxiskader wendet, muß einerseits die Darstellung ausführlich genug sein, um das notwendige Wissen zu vermitteln, andererseits muß berücksichtigt werden, daß der Leser durch den Umfang nicht überfordert wird.

Er muß in einer endlichen Zeit das Werk durcharbeiten können. Daher wird diese Reihe im Umfang begrenzt. Mindestumfang ist 160 Druckseiten, maximaler Umfang 240 Druckseiten. Die Reihe erscheint mit einer einheitlichen Gestaltung des Einbands. Die einzelnen Bände kommen in loser Folge ohne Bandnummer heraus (Bild 1).

Als erster Band dieser neuen Reihe ist der „Wissensspeicher Mikrorechnerprogrammierung" von *L. Claßen* und *U. Oefler* erschienen. Es ist ein Nachschlagewerk mit hoher Informationsdichte. Dieser Band vermittelt neben einer genauen Systemübersicht über alle DDR-Mikroprozessorfamilien (U 880, U 881/2 und U 8000) insbesondere Softwarewissen zu den Komplexen UDOS-Betriebssystem, PLZ/ASM, BASIC und PASCAL.

Die erste Auflage war sofort vergriffen. Noch in diesem Jahr wird eine zweite Auflage erscheinen.

Im nächsten Jahr wird diese Reihe fortgesetzt mit den Titeln „UNIX und C — Ein Anwenderhandbuch" und „Programmierung des 16-Bit-Mikroprozessorsystems U 8000".

Wir werden unsere Leser auch über diese Titel rechtzeitig informieren.

Mit dieser neuen Reihe hat der Verlag einem großen Informationsbedürfnis über ein volkswirtschaftlich bedeutendes Gebiet Rechnung getragen.

J. Reichenbach, Berlin EA 2217

Planung öffentlicher Energieverteilungsnetze

Gestaltung, Bemessung, Betriebsweise, Netzrückwirkung

Von *L. Bochanky*. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1985. 1. Auflage

Jahrzehnte alt ist die Forderung, man solle sich stärker den Mittel- und Niederspannungsnetzen widmen. Energieverteilungsnetze transportieren den größten Teil der Energie zu Verbrauchern, binden die meisten Investitionen, haben den größten Anteil an den Transportverlusten und besitzen den größten Einfluß auf die Zuverlässigkeit der Versorgung.

Nun liegt endlich mit obigem Titel ein Buch vor, das dem Gewicht des Gegenstandes gerecht wird. Es wurde von einem Manne geschrieben, der selbst mitten in den aktuellen Problemen der Netzplanungspraxis steht und sich darin bestens auskennt.

Das Buch gliedert sich in die Teile A Grundlagen und B Planungsempfehlungen. Im ersteren wird eine einführende Übersicht gegeben, werden Ziele, Planungs- und Berechnungsmethoden bis zur Optimierung behandelt und die Anforderungen dargestellt, die aus der Belastbarkeit der Betriebsmittel, dem Netzzustand, der Leistungsentwicklung, der Versorgungszuverlässigkeit und der Energiequalität an die Planung gestellt werden.

Der Teil B gibt Planungsempfehlungen für Niederspannungsnetze, Mittelspannungsnetze, deren Schutz- und Automatisierungsanlagen und behandelt den Anschluß von Abnehmern, die Netzrückwirkungen verursachen.

Ein Verzeichnis der Abkürzungen, ein Verzeichnis der Formelzeichen und Symbole, ein Literatur- und Quellenverzeichnis und ein Sachwörterverzeichnis erleichtern die Arbeit mit dem Buch.

Es ist auch sonst für den Netzplaner — aber nicht nur für ihn — sehr hilfreich angelegt. Der Stoff ist schlicht und dennoch anspruchsvoll abgehandelt und macht allenthalben den Eindruck der Selbstverständlichkeit. Andererseits spürt man, daß der Autor sehr wohl auch weitergehende Stoffbereiche in Betracht gezogen hat. Er wählte geschickt und verweist auf Literatur, wenn exaktere Berechnungen oder weitergehende Betrachtungen in Einzelfällen nötig sind.

Auch die Genauigkeitsansprüche sind stets aus praktischer Sicht bestimmt und nicht überzogen. Andererseits vermeidet *Bochanky* unangemessene Vereinfachungen. Die Nullimpedanzen unterliegen eben vielen nicht genau erfaßbaren Einflüssen. Alle für die Planung und Berechnung wichtigen Konstanten sind zur Hand, an vielen Stellen finden sich Hinweise für Ermessensentscheidungen, die der Leser dankbar annehmen wird. Knappe und aussagefähige Anwendungsbeispiele sowie immer wieder Daten, Erfahrungs- und Orientierungswerte unterstützen das Verständnis und erleichtern die Anwendung.

Wer nach dem Hinweis, daß die Ausfallwahrscheinlichkeit eine bedingte ist, den mathematischen Formalismus bedingter Wahrscheinlichkeiten erwartet, sieht sich angenehm getäuscht. Die Bedingung erweist sich als höchst einfach und alles Folgende auch.

Bochanky hat viele Stoffteile aufgenommen, die sich noch in Bewegung befinden und dabei ein sicheres Gespür für Neues und Wesentliches bewiesen.

- Risikobetrachtungen,
- Weiterverwendung von Betriebsmitteln,
- Rangfolgeentscheidungen,
- Berücksichtigung vielfältiger Ungewißheiten der Planung mit praktikablen Vorschlägen

und anderes werden behandelt. Gewissen Modetrends ist er jedoch ausgewichen. Die mehrkriterielle Optimierung wird erwähnt, aber nicht empfohlen, und die empfohlene Wichtung suboptimaler Varianten nach der Aufwandsminimierung läuft ja wieder etwa auf die monetäre Optimierung hinaus. Die folgenden Stoffteile belegen dies auch. Der Autor rechnet zukünftig mit starken Beschränkungen der Investitionsmittel für Energieverteilungsnetze. Bei der Aufwandsminimierung hat er vielleicht auch deshalb vornehmlich den Aufwand im Verteilungsnetz im Blick. Eine konsequente Minimierung des gesamten Aufwandes könnte dies ein wenig relativieren, obwohl man weiß, daß der Abschnitt „Hindernisse" auf S. 24 aus gutem und aktuellem Grunde geschrieben wurde.

Zu den erfaßten Schäden bei den Abnehmern lassen sich — besonders bei Risikoentscheidungen — die Schäden im Verteilungsnetz noch in einfacher Weise hinzufügen.

Bis zu einer nächsten Auflage hat die Kleinrechentechnik auch für die Planung gewiß

noch etwas an Boden gewonnen, so daß daran zu denken ist, sie explizit zu berücksichtigen.
Man darf für dieses ausgezeichnete Buch, dem der Verlag eine gute Ausstattung gegeben hat, auf eine baldige Neuauflage hoffen. Es kann Netzplanungsingenieuren, allen Fachkollegen der Energieversorgung, die in und mit Verteilungsnetzen arbeiten, und Studenten starkstromtechnischer Fachrichtungen in höheren Studienjahren empfohlen werden.

E. Muschick, Zittau EA 2198

Signale und Funktionaltransformationen

Von *G. Fritzsche*. Berlin: VEB Verlag Technik 1985. 1. Auflage, 174 Seiten, 39 Bilder, 38 Tafeln, 31 Lit. 18,— M
Bestellnummer: 553 4567

Funktionaltransformationen gestatten die Beschreibung eines Vorganges völlig gleichberechtigt entweder im Originalbereich oder in einem Bildbereich. Sie decken einerseits theoretische Zusammenhänge auf und erleichtern andererseits in vielen Fällen die Lösung praktischer Aufgaben. Das mit der Entwicklung der modernen Rechentechnik einhergehende zunehmende Interesse an diskreten Verfahren und effektiven Algorithmen, wie der schnellen Fouriertransformation, unterstreichen die Bedeutung der aufgegriffenen Problematik in der heutigen Zeit. Das vorliegende Buch enthält die zum Verständnis notwendigen Grundlagen in gestraffter Form. Es folgen in jedem Abschnitt Anwendungen mit einer Fülle praktischer Beispiele, und schließlich wird der Leser angeregt, seinen Erkenntnisstand an Hand von zahlreichen Aufgaben zu überprüfen.
Inhaltlich werden in einem ausgewogenen Stufenprogramm die Fourierreihenentwicklung, die Fouriertransformation, die Laplacetransformation, die z-Transformation, die Hilberttransformation und die diskrete Fouriertransformation (einschließlich Hinweisen auf die schnelle Fouriertransformation) dargestellt. Auf die diskrete Hilberttransformation wird leider verzichtet. Besonderheiten, wie z. B. Abtasttheoreme, Faltung, Korrelation, Quantisierung und Codierung werden entsprechend ihrer praktischen Bedeutung eingehend erläutert. Tragender Gesichtspunkt ist hierbei das Kennenlernen und durchsichtige Begründen der Zusammenhänge. Für weitergehende Anwendungen ist es unerläßlich, Spezialliteratur zu Rate zu ziehen.
Das Buch wendet sich an Hoch- und Fachschulingenieure im Forschungs- und Entwicklungsbereich sowie an Absolventen und Studenten naturwissenschaftlicher und technischer Fachrichtungen, die in kurzgefaßter Form die Möglichkeiten der Signalbeschreibung kennenlernen wollen. Diesem Leserkreis kann es als Arbeitsmittel sehr empfohlen werden.

G. Müller, Dresden EA 2220

Elektrische Messungen in der Technik (Electrical Measurements in Engineering)

Von *A. Boros*. Budapest: Verlag der Ungarischen Akademie der Wissenschaften 1985. 1. Auflage, 336 Seiten, 235 Bilder

Das von *A. Boros* vorgelegte Buch gibt einen methodischen Überblick über das Gesamtgebiet der elektrischen Messung nichtelektrischer, insbesondere mechanischer Größen. In einem einleitenden Teil werden zunächst Grundfragen der Meßtechnik, der elektrischen Meßtechnik und der rechnerunterstützten Meßgerätetechnik behandelt. Im zweiten Hauptteil werden auf 186 Seiten charakteristische Methoden der Wandlung nichtelektrischer Größen in elektrische Größen und die Arbeitsprinzipien der benutzten Signalwandler beschrieben. Ausführlich, auch mit tabellarischen Übersichten über gerätemäßige Ausführungsmöglichkeiten, werden Widerstandswandler, kapazitive und induktive Wandler, aktive Wandler auf der Grundlage des thermoelektrischen und des piezoelektrischen Effektes, Hallwandler, sowie Wandler auf der Grundlage des Ultraschalls und auf der Grundlage von Laserstrahlen behandelt. Der dritte Teil des Buches ist der elektrischen Messung typischer mechanischer Größen gewidmet. Behandelt wird die Messung der Länge, des Winkels, der Geschwindigkeit und der Beschleunigung, die Messung der Kraft, des Drehmomentes, der mechanischen Arbeit und der Leistung. Weiter wird ausführlich diskutiert die Messung der Zeit, der Frequenz, des Phasenwinkels, des Druckes, des Volumens und der Temperatur.
Ein umfangreiches Literaturverzeichnis berücksichtigt auch deutsche und englische Literatur. Das Buch ist klar geschrieben und ohne speziellere Vorkenntnisse verständlich.

R. Schönfeld, Dresden EA 2254

Logischer Entwurf binärer Systeme

Von *H. J. Zander*. Berlin: VEB Verlag Technik 1985. 2., bearbeitete Auflage, 267 Seiten, 214 Bilder. Lederin 36,— Mark.
Bestell-Nr. 5534735

Es läßt sich dem Verfasser bescheinigen, daß ihm das Anliegen des Buches, „einen tiefen Einblick in die Probleme des logischen Entwurfs binärer Systeme zu vermitteln", gut gelungen ist. Der vermittelte Stoff ist nach wie vor aktuell, das beweist die in kurzer Zeit notwendig gewordene zweite, bearbeitete Auflage. Es wurde vor allem der Abschnitt „Mikroprozessoren und programmtechnische Realisierung binärer Systeme" völlig neu bearbeitet und vom Umfang her wesentlich erweitert. Das Buch behandelt außerdem die Beschreibung und schaltungstechnische Realisierung kombinatorischer und sequentieller binärer Systeme. Dies erfolgt unter Verwendung verallgemeinerter Automatenmodelle und praktikabler Beschreibungsmethoden (Bänder, Tabellen, Graphen, Petrinetze u. a.) und eines einheitlichen Synthesekonzeptes. Nützlich und über den üblichen Rahmen hinausgehend sind die Untersuchungen zu dynamischen Störeffekten.
Im Buch verbinden sich wissenschaftliche Exaktheit und Anschaulichkeit. Durchgängige Arbeitsbeispiele und eine Reihe von Synthesebeispielen lockern den gebotenen Stoff auf. Dadurch erhält die Monografie auch den Charakter eines Lehrbuches. Das Buch ist gedacht als Arbeitsmittel für Projektanten von Automatisierungsmitteln, ist aber auch Studenten und Absolventen der Fachrichtungen zu empfehlen, die sich mit der Umsetzung schaltungstechnischer Konzepte in die technische Realität zu befassen haben.

W. Fritzsch, Karl-Marx-Stadt EA 2216

Abschätzung der Genauigkeit von Meßergebnissen

Von *P. Täubert*. Berlin: VEB Verlag Technik 1985. 79 Seiten, 15 Abb., 13 Tafeln. Broschur 8,— M.
Bestell-Nr. 5533206

Die Frage der Genauigkeit von Meßergebnissen spielt eine zentrale Rolle in der gesamten Meßtechnik. Wegen der stets vorhandenen Meßfehler kommt der Abschätzung dieses Fehlers eine große Bedeutung zu. Der Band stellt das hierzu erforderliche Rüstzeug in knapp 80 Seiten zusammen, wobei auf leichte Verständlichkeit besonderer Wert gelegt wird. Als Vorkenntnisse werden nur die Grundbegriffe der Differential- und Integralrechnung vorausgesetzt, wie sie ein Abiturient mitbringt.
Nach kurzen einleitenden Bemerkungen werden die Fehler bei direkter Messung behandelt, von Schätzungen bis hin zu speziellen Konfidenzschätzungen sowie systematischen Meßabweichungen. Anschließend werden kurz die Fehler bei indirekten Messungen besprochen. Ein weiterer Abschnitt befaßt sich mit der Ausgleichsrechnung. Auf den letzten 15 Seiten sind für die Praxis wichtige Überblickstabellen zusammengestellt und Aussagen zur Zusammenfassung der Vertrauensgrenzen unter verschiedenen Voraussetzungen abgeleitet.
Der Band stellt damit in zweckmäßiger, knapper und trotzdem leicht verständlicher Form, für die Praxis gut aufbereitet, die Grundlagen der Fehlerabschätzungen für statische Messungen zusammen. Messungen zeitveränderlicher Größen werden nicht behandelt. Zwischengeschaltete Beispiele und durchgerechnete Spezialfälle erhöhen den Wert des Büchleins, das besonders auf die Bedürfnisse der in der Praxis tätigen Meßtechniker zugeschnitten ist. Es kann daher allen empfohlen werden, die sich schnell einen Überblick über dieses Gebiet verschaffen möchten.

E.-G. Woschni, Karl-Marx-Stadt EA 2214

Documentation

Maucksch, S.; Freitag, W.; Dietrich, M.: **Designing Aspects of TE-Cable Testing Devices on Base of a Wide Band TE-Measuring System**

ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 6, pp. 205—207, 5 Figs., 1 Table, 20 Refs.

Starting from the basic noise level, which can be expected in-situ of the testing field, it is illustrated, how by appropriate selection and combination of measures of reducing noise level a basic noise level of 0,2 pC may be reached also under complicated conditions.

Lemke, E.; Haller, R.: **Normal Sparking Gap Adapted to Testing Partial Discharge Measuring Circuits with High-Voltage**

ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 6, pp. 208—210, 5 Figs., 2 Refs.

To improve the possibilities of comparing partial discharge measurements a normal sparking gap is proposed. Comparing measurements in high-voltage testing fields of the GDR as well as in the framework of the RGW testing field organization INTERELEKTROTEST acknowledge its aptitude for testing TE-measuring circuits with high-voltage.

Menzel, W.; Bärsch, R.; Pilling, J.: **To the Evaluating of the Resistance to Partial Discharges of Plastic Insulator Surfaces**

ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 6, pp. 210—212, 3 Figs., 2 Tables, 11 Refs.

Partial discharges result in irreversible damages of the insulator surfaces. A testing method of evaluating the resistance of insulations to partial discharges is represented. The conditions are discussed, under which the resistance to partial discharges through insulating paints may be increased.

Rausendorf, S.; Schufft, W.: **Computation of the Electric Field of Ball Shaped Disk Segmental Electrodes**

ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 6, pp. 213—216, 8 Figs., 1 Table, 4 Equations, 9 Refs.

A method of computing the electric field of ball shaped disk segmental electrodes freely in the space is represented. This one is based upon the charging method and is realized computationally for the data processing unit type EC 1040. The increasing of the electric field strength, compared with a ball of the same dimensions (segmental factor of the maximum field strength), averages 1,4 to 1,6. By means of the so determind field distribution it may be concluded to the maximum field strength of real arrangements of electrodes.

Pflicke, W.; Lemke, E.: **To the Problem of Partial Discharges at Disk Segmental Electrodes**

ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 6, pp. 217—219, 5 Figs., 12 Refs.

Starting from experimental investigations with disk segmental electrodes (TSE) the striking and the characteristics of partial discharges, which may occur at the sharp-cornered edge of the disk electrodes before the Streamer application as well as at its rounding off, and its influence on the Streamer striking respectively the disruption are described. Practical conclusions for designing and using TSE in high-voltage testing and measuring circuits are derived.

Schufft, W.; Beyer, J.: **Measurements of the Disruptive Voltage at a 2,7 m Disk Segmental Ball to Plane under Outdoor Conditions**

ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 6, pp. 220—222, 4 Figs., 8 Refs.

At a ball shaped disk segmental ball of 2,7 m in diameter to a plane (electrode distance 1,5 m) the influence of the environmental conditions in outdoor application on the disruptive voltage is studied. A significant decreasing of the disruptive voltage was determined, compared with indoor operation. In occuring water drops the electrode arrangements offer peak-to-plate behaviour.

Lemke, E.: **Precomputation of the Disruptive Voltage of Long Air Insulating Pathes during Loading with Switching Pulse Voltages of Critical Rise Time**

ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 6, pp. 222—224, 4 Figs., 1 Table, 8 Equations, 9 Refs.

On base of the Streamer-Leader-model a possibility of computing disruption characteristic curves of long air gaps is presented, which are representative of outdoor and station insulations. Through calibrating the disruption model with regard to the gradient and the critical range of the Streamer discharge on base of experimental testing data with a predetermined distance of the electrodes an adaption of the computed characteristic curves to hitherto known computing models succeeds within a distance range between about 2 m to about 10 m by means of a single formula.

Bachmann, H.; Köckritz, M.; Vetters, G.: **A New Control of Pulse Voltage Testing Generators**

ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 6, pp. 225—227, 3 Figs., 7 Refs.

Construction and operation mode of a new control of pulse voltage testing plants are described. The control allowas the half-automated testing mode. By coupling with external devices, e.g. microcomputers, full-automated high-voltage tests are possible.

Thümmler, K.: **Digital Peak Voltmeter for D.C. and A.C. Voltages**

ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 6, pp. 227—229, 3 Figs., 3 Refs.

A handy measuring device, simple to operate, to the quick and exact measurement of testing high-voltages is represented, which allowas measuring a wide voltage range, $0{,}1\ \mathrm{V} \geqq \hat{u} \leqq 1000\ \mathrm{kV}$.

Wolf, J.: **Computation of Non-Steady Processes in High-Voltage Testing Plants**

ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 6, pp. 229—231, 4 Figs., 4 Refs.

A network analyzing programme for the personal computer A 5120 is described, which makes possible computing switching plants with 50 junctions and 100 branches with considering non-linear switching elements and which already has been used successfully for designing testing plants.

Hauschild, W.; Wolf, J.: **Statistical Evaluation with the Personal Computer: Determination and Illustration of Empirical Normal Distributions**

ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 6, pp. 231—236, 5 Figs., 3 Equations, 6 Refs.

A BASIC-programme for the personal computer A 5120 is described, by means of which series of measurements (samples) may be evaluated statistically and illustrated graphically. This evaluation is made by weighting the independence of the sample on the base of the normal distribution.

Документация

Маукш, З.; Фрайтаг, В.; Дитрих, М.: **Аспекты оформления комплектов приборов испытания кабелей на частичный разряд на базе широкополосной измерительной системы частичного разряда**

ELEKTRIE, Берлин 40 (1986) 6, стр. 205—20,7 5 рис., 1 табл., 20 лит.

Основываясь на основном уровне помех, ожидаемом на месте лаборатории испытания на частичный разряд, показывается, каким образом путем целесообразного подбора и совмещения мер по понижению мешающих сигналов может обеспечиваться, даже в сложных условиях, основной уровень помех не превышающий 0,2 pC.

Лемке, Э.; Халлер, Р.: **Стандартный искровой разрядник для проверки измерительных цепей частичного разряда при высоком напряжении**

ELEKTRIE, Берлин 40 (1986) 6, стр. 208—210, 5 рис., 2 лит.

Для улучшения сравнимости измерений частичных разрядов рекомендуется применение стандартного искрового разрядника. Сравнительные измерения, проведенные в высоковольтных испытательных лабораториях ГДР, а также в рамках организации испытательных лабораторий СЭВ ИНТЕРЭЛЕКТРОТЕСТ подтвержают его пригодность для проверки измерительных цепей частичных разрядов в условиях высокого напряжения.

Менцель, В.; Бэрш, Р.; Пиллинг, Й.: **Об оценке устойчивости против частичных разрядов поверхностей пластмассовых изоляторов**

ELEKTRIE, Берлин 40 (1986) 6, стр. 210—212, 3 рис., 2 табл., 11 лит.

Частичные разряды на поверхностях изолирующих материалов вызывают невосстанавливаемые повреждения. Представляется способ испытания для оценки устойчивости изолирующих материалов против частичных разрядов. Излагаются условия, при которых повышается устойчивость против частичных разрядов благодаря нанесению покрытия из изолирующего лака.

Раузендорф, З.; Шуфft, В.: **Расчет электрического поля шарообразных тарельчатосегментных электродов**

ELEKTRIE, Берлин 40 (1986) 6, стр. 213—216, 8 рис., 1 табл., 4 уравн., 9 лит.

Представляется способ расчета электрического поля шарообразных тарельчато-сегментных электродов, находящихся в свободном пространстве. Он основывается на методе определения заряда и программно реализован для ЭВМ ЕС 1040. Повышение напряженности поля по сравнению с шаром того же размера (коэффициент сегментации наивысшей напряженности поля) составляет от 1,4 до 1,6. По распределению поля, определяемому таким образом, можно заключить о наивысшей напряженности поля реальных электродных установок.

Пфликке, В.; Лемке, Э.: **О проблематике частичных разрядов на тарельчато-сегментных электродах**

ELEKTRIE, Берлин 40 (1986) 6, стр. 217—219, 5 рис., 12 лит.

Основываясь на экспериментальных исследованиях тарельчато-сегментных электродов описываются зажигание и характеристика частичных разрядов, которые могут возникнуть перед началом стримерного разряда на острых кромках тарельчатых электродов, а также на их округлениях, и их влияние на зажигание стримерного разряда и пробой соответственно. Выводятся практические заключения по оформлению и применению тарельчато-сегментных электродов в высоковольтных испытательных и измерительных цепях.

Шуфft, В.; Бейер, Й.: **Измерения пробивного напряжения тарельчато-сегментного шара диаметром 2,7 м против плоскости в условиях наружной установки.**

ELEKTRIE, Берлин 40 (1986) 6, стр. 220—222, 4 рис., 8 лит.

Проведено исследование влияния окружающей среды на пробивное напряжение при наружной установке тарельчато-сегментного шара с диаметром 2,7 м против пластины (расстояние между электродами 1,5 м). Установлено существенное понижение пробивного напряжения по сравнению с установкой в помещении. В случае появления водяных капель электродная установка показывает характеристику разряда между острием и плоским электродом.

Лемке, Э.: **Предварительный расчет пробивного напряжения длинных промежутков воздушной изоляции при воздействии импульсных коммутационных напряжений с критичной длительностью фронта**

ELEKTRIE, Берлин 40 (1986) 6, стр. 222—224, 4 рис., 1 табл., 8 уравн., 9 лит.

На основе стример-лидер-модели указывается возможность расчета характеристик пробоя длинных воздушных промежутков, характерных для изоляций воздушных линий и станций. Путем калибровки модели пробоя относительно градиента и критичной дальности действия стримерного разряда на основе экспериментальных данных, полученных при заданном расстоянии между электродами, удается согласование расчетных характеристик с известными до сих пор моделями расчета в диапазоне расстояний от приблизительно 2 м до 10 м и больше при помощи одной единственной формулы.

Бахманн, Х.; Кёкритц, М.; Феттерс, Г.: **Новое устройство управления для испытательных генераторов импульсного напряжения**

ELEKTRIE, Берлин 40 (1986) 6, стр. 225—227, 3 рис., 7 лит.

Описываются построение и принцип действия нового устройства управления для испытательных установок импульсного напряжения. Устройство управления позволяет проведение испытания в полуавтоматическом режиме. Путем сопряжения его с внешними устройствами как, например, микро-ЭВМ, обеспечивается возможность проведения полностью автоматизированных высоковольтных испытаний.

Тюммлер, К.: **Цифровой прибор измерения пиьового напряжения для постоянного и переменного напряжений**

ELEKTRIE, Берлин 40 (1986) 6, стр. 227—229, 3 рис., 3 лит.

Представляется удобный по формату и простой по облуживанию измерительный прибор, предназначенный для быстрого и точного измерения высоковольтных испытательных напряжений, позволяющий измерения в широком диапазоне напряжений, $0{,}1\ \mathrm{B} \leqq \hat{u} \leqq 1000\ \mathrm{кВ}$.

Вольф, Й.: **Расчет нестационарных процессов в высоковольтных испытательных установках**

ELEKTRIE, Берлин 40 (1986) 6, стр. 229—231, 4 рис., 4 лит.

Описывается программа сетевого анализа для бюрокомпьютера А 5120, обеспечивающая возможность расчета распределительных устройств, содержащих 50 узлов и 100 ветвей с учетом нелинейных коммутирующих элементов, которая уже успешно была использована для проектирования испытательных установок.

Хаушильд, В.; Вольф, Й.: **Статистическая обработка при помощи бюрокомпьютера: определение и изображение эмпирических нормальных распределений**

ELEKTRIE, Берлин 40 (1986) 6, стр. 231—236, 5 рис., 3 уравн., 6 лит.

Описывается программа БЕЙЗИК для бюрокомпьютера А 5120, при помощи которой обеспечивается возможность статистической обработки и графического изображения серий измерения (выборочных проверок).

ELEKTRIE

Maucksch, S.; Freitag, W.; Dietrich, M.: **Gestaltungsgesichtspunkte für TE-Kabelprüfplätze auf der Basis eines breitbandigen TE-Meßsystems**

ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 6, S. 205—207 5 Bilder, 1 Tafel; 20 Lit.

Ausgehend von dem am Ort des TE-Prüffeldes zu erwartenden Grundstörpegel wird gezeigt, wie durch zweckmäßige Auswahl und Kombination von Maßnahmen zur Störsignalreduzierung ein Grundstörpegel von 0,2 pC auch unter komplizierten Bedingungen erreicht werden kann.

Lemke, E.; Haller, R.: **Normalfunkenstrecke zur Überprüfung von Teilentladungs-Meßkreisen bei Hochspannung**

ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 6, S. 208—209, 5 Bilder, 2 Lit.

Zur Verbesserung der Vergleichbarkeit von Teilentladungsmessungen wird eine Normalfunkenstrecke empfohlen. Vergleichsmessungen in Hochspannungs-Prüffeldern der DDR sowie im Rahmen der RGW-Prüffeldorganisation INTERELEKTROTEST bestätigten ihre Eignung zur Überprüfung von TE-Meßkreisen bei Hochspannung.

Menzel, W.; Bärsch, R.; Pilling, J.: **Zur Bewertung der Teilentladungsbeständigkeit von Kunststoffisolator-Oberflächen**

ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 6, S. 210—212, 3 Bilder, 2 Tafeln, 11 Lit.

Teilentladungen führen zu irreversiblen Schädigungen an den Isolierstoffoberflächen. Es wird ein Prüfverfahren für die Bewertung der Beständigkeit von Isolierstoffen gegenüber Teilentladungen vorgestellt. Die Bedingungen, unter denen sich die Teilentladungsbeständigkeit durch Isolierlackanstriche erhöht, werden dargelegt.

Rausendorf, S.; Schufft, W.: **Berechnung des elektrischen Feldes kugelförmiger Teller-Segmentelektroden**

ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 6, S. 213—216, 8 Bilder, 1 Tafel, 4 Gln., 9 Lit.

Es wird ein Verfahren zur Berechnung des elektrischen Feldes kugelförmiger Teller-Segmentelektroden frei im Raum vorgestellt. Dieses basiert auf dem Ladungsverfahren und ist für die EDVA EC 1040 rechentechnisch realisiert. Die Feldstärkeerhöhung gegenüber einer gleichgroßen Kugel (Segmentierungsfaktor der Höchstfeldstärke) beträgt 1,4 bis 1,6. Aus der so ermittelten Feldverteilung kann auf die Höchstfeldstärke realer Elektrodenanordnungen geschlossen werden.

Pflicke, W.; Lemke, E.: **Zur Problematik von Teilentladungen an Teller-Segmentelektroden**

ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 6, S. 217—219 5 Bilder, 12 Lit.

Ausgehend von experimentellen Untersuchungen an Teller-Segmentelektroden (TSE) wird die Zündung und Charakteristik von Teilentladungen, die vor dem Streamereinsatz am scharfkantigen Rand der Tellerelektroden sowie an deren Abrundung auftreten können, und ihr Einfluß auf die Streamerzündung bzw. den Durchschlag beschrieben. Es werden praktische Schlußfolgerungen für die Gestaltung und den Einsatz von TSE in Hochspannungsprüf- und Meßkreisen abgeleitet.

Schufft, W.; Beyer, J.: **Messungen der Durchschlagspannung an einer 2,7-m-Teller-Segmentkugel gegen Ebene unter Freiluftbedingungen**

ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 6, S. 220—222, 4 Bilder, 8 Lit.

An einer kugelförmigen Teller-Segmentkugel mit 2,7 m Durchmesser gegen eine Platte (Elektrodenabstand 1,5 m) wurde der Einfluß der Umgebungsbedingungen beim Freilufteinsatz auf die Durchschlagspannung untersucht. Es wurde eine wesentliche Absenkung der Durchschlagspannung gegenüber dem Innenraumbetrieb festgestellt. Beim Auftreten von Wassertropfen zeigt die Elektrodenanordnung Spitze-Platte-Verhalten.

Lemke, E.: **Vorausberechnung der Durchschlagspannung langer Luftisolierstrecken bei Belastung mit Schaltimpulsspannungen kritischer Stirnzeit**

ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 6, S. 222—224, 4 Bilder, 1 Tafel, 8 Gln., 9 Lit.

Auf der Grundlage des Streamer-Leader-Modells wird eine Berechnungsmöglichkeit für Durchschlagkennlinien langer Luftstrecken, die für Freileitungs- und Stationsisolierungen repräsentativ sind, angegeben. Durch eine Kalibrierung des Durchschlagmodells hinsichtlich des Gradienten und der kritischen Reichweite der Streamerentladung aufgrund experimenteller Versuchsdaten bei einem vorgegebenen Elektrodenabstand gelingt eine Anpassung der berechneten Kennlinien an bisher bekannte Berechnungsmodelle in einem Abstandsbereich von etwa 2 m bis über 10 m mittels einer einzigen Formel.

Bachmann, H.; Köckritz, M.; Vetters, G.: **Eine neue Steuerung für Impulsspannungs-Prüfgeneratoren**

ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 6, S. 225—227, 3 Bilder, 7 Lit.

Aufbau und Wirkungsweise einer neuen Steuerung für Impulsspannungs-Prüfanlagen werden beschrieben. Die Steuerung gestattet den halbautomatischen Prüfablauf. Durch Kopplung mit externen Geräten, wie z. B. Mikrorechnern, sind vollautomatische Hochspannungsprüfungen möglich.

Thümmler, K.: **Digitales Scheitelspannungs-Meßgerät für Gleich- und Wechselspannungen**

ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 6, S. 227—228, 3 Bilder, 3 Lit.

Es wird ein handliches, einfach zu bedienendes Meßgerät zur schnellen und genauen Messung von Prüf-Hochspannungen vorgestellt, das einen weiten Spannungsbereich, $0{,}1\ \mathrm{V} \leqq \hat{u} \leqq 1000\ \mathrm{kV}$, zu messen gestattet.

Wolf, J.: **Berechnung nichtstationärer Vorgänge in Hochspannungsprüfanlagen**

ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 6, S. 229—231, 4 Bilder, 4 Lit.

Es wird ein Netzanalyseprogramm für den Bürocomputer A 5120 beschrieben, das die Berechnung von Schaltanlagen mit 50 Knoten und 100 Zweigen unter Einbeziehung nichtlinearer Schaltelemente ermöglicht und bereits erfolgreich für den Entwurf von Prüfanlagen eingesetzt worden ist.

Hauschild, W.; Wolf, J.: **Statistische Auswertung mit dem Bürocomputer: Ermittlung und Darstellung empirischer Normalverteilungen**

ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 6, S. 231—236, 5 Bilder, 3 Gln., 6 Lit.

Es wird ein BASIC-Programm für den Bürocomputer A 5120 beschrieben, mit dessen Hilfe Meßreihen (Stichproben) statistisch ausgewertet und grafisch dargestellt werden können. Diese Auswertung erfolgt nach der Bewertung der Unabhängigkeit der Stichprobe auf der Basis der Normalverteilung.

Herausgeber	Kammer der Technik, Fachverband Elektrotechnik
Verlag	VEB Verlag Technik DDR-1020 Berlin, Oranienburger Str. 13/14 Telegrammadresse: Technikverlag Berlin Telefon: 28700; Telex: 011 22 28 techn. dd
Verlagsdirektor	Dipl.-Ing. *Klaus Hieronimus*
Redaktion	Dr.-Ing. *Klaus Heide*, Verantwortlicher Redakteur (Telefon: 28703 45)
Lizenz-Nr.	1100 des Presseamtes beim Vorsitzenden des Ministerrates der Deutschen Demokratischen Republik
Gesamtherstellung	III/18/328 Messedruck Leipzig, BT Borsdorf 7122 Borsdorf
Gestalter	*Eckhardt Natorp* (Telefon: 28702 87)
Anzeigenannahme	Für Bevölkerungsanzeigen alle Anzeigenannahmestellen in der DDR, für Wirtschaftsanzeigen der VEB Verlag Technik, 1020 Berlin, Oranienburger Str. 13/14, PSF 201 Anzeigenpreisliste Nr. 7 Auslandsanzeigen: Interwerbung GmbH, DDR-1157, Berlin, Hermann-Duncker-Str. 89
Erfüllungsort und Gerichtsstand	Berlin-Mitte. Der Verlag behält sich alle Rechte an den von ihm veröffentlichten Aufsätzen und Abbildungen, auch das der Übersetzung in fremde Sprachen, vor. Auszüge, Referate und Besprechungen sind nur mit voller Quellenangabe zulässig.
AN (EDV)	6730
Erscheinungsweise Heftpreis	monatlich 1 Heft 2,50 M, Abonnementpreis vierteljährlich 7,50 M. Auslandspreise sind den Zeitschriftenkatalogen des Außenhandelsbetriebes BUCHEXPORT zu entnehmen.
Bezugsmöglichkeiten	
DDR	sämtliche Postämter
SVR Albanien	Direktorije Quendrore e Perhapjes dhe Propaganditit te Librit Rruga Konference e Pezes, Tirana
VR Bulgarien	Direkzia R. E. P., 11 a, Rue Paris, Sofia
VR China	China National Publications Import and Export Corporation, West Europe Department, P. O. Box 88 Beijing
ČSSR	PNS — Ústřední Expedicia a Dovoz Tisku Praha, Slezská 11, 120 00 Praha 2 PNS, Ústredna Expedicia a Dovoz Tlače, Pošta 022, 885 47 Bratislava
SFR Jugoslawien	Jugoslovenska Knjiga, Terazije 27, Beograd; Izdavačko Knjižarsko Produzeće MLADOST, Ilica 30, Zagreb
Koreanische DVR	CHULPANMUL Korea Publications Export & Import Corporation, Pyongyang
Republik Kuba	Empresa de Comercio, Exterior de Publicationes, O'Reilly No. 407, Ciudad Habana
VR Polen	C. K. P. i. W. Ruch, Towarowa 28, 00-958 Warszawa
SR Rumänien	D. E. P. Bucaresti Piata Scinteii, Bucaresti
UdSSR	Städtische Abteilungen von Sojuzpečat' oder Postämter und Postkontore
Ungarische VR	P. K. H. I., Külföldi Elöfizetési Osztály, P. O. Box 16, 1426 Budapest
SR Vietnam	XUNHASABA 32, Hai Ba Trung, Hà Nôi
BRD und Berlin (West)	ESKABE Kommissions-Grossobuchhandlung, Postfach 36, 8222 Ruhpolding/Obb.; Helios Literatur-Vertriebs-GmbH, Eichborndamm 141 – 167, Berlin (West) 52; Kunst und Wissen Erich Bieber OHG, Postfach 46, 7000 Stuttgart 1; Gebrüder Petermann, BUCH + ZEITUNG INTERNATIONAL, Kurfürstenstraße 111, Berlin (West) 30
Österreich	Helios Literatur-Vertriebs-GmbH & Co. KG, Industriestraße B 13, 2345 Brunn am Gebirge
Schweiz	Verlagsauslieferung Wissenschaft der Freihofer AG, Weinbergstr. 109, 8033 Zürich
Alle anderen Länder	örtlicher Fachbuchhandel; BUCHEXPORT Volkseigener Außenhandelsbetrieb der Deutschen Demokratischen Republik, DDR-7010 Leipzig, Postfach 160; und Leipzig Book Service, DDR-7010 Leipzig, Talstraße 29

Mit dem TuR-Hochspannungs-Bausteinsytsem können Sie eine an Ihr Problem angepaßte Hochspannungs-Prüfanlage aufbauen

Es ist gleichermaßen für den Einsatz in Forschung/Entwicklung, Ausbildung, industrieller Qualitätskontrolle und Vor-Ort-Diagnostik geeignet und umfaßt ein Sortiment von Hochspannungskomponenten (Transformatoren, Kondensatoren, Gleichrichtern usw.) sowie Steuer- und Meßgeräten, mit dem leistungsschwache Wechselspannungs-Prüfanlagen von 5 bis 100 kV und Gleichspannungs-Prüfanlagen von 7 bis 270 kV aufgebaut werden können. Ebenfalls ermöglicht es die Erweiterung zu Teilentladungs-Meßkreisen.

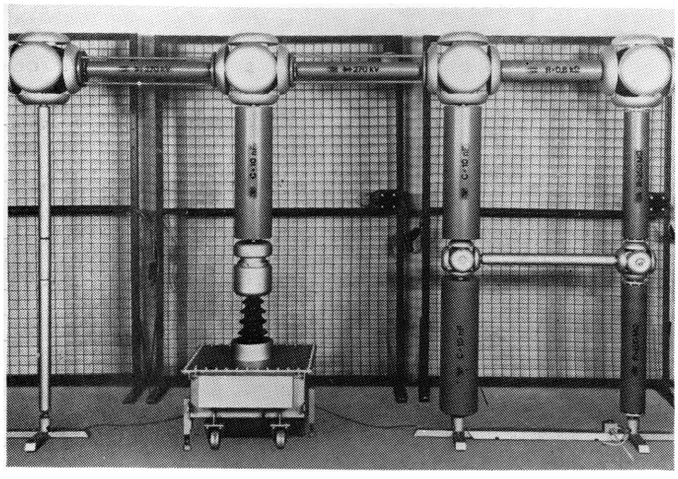


Bild 1. Gleichungsspannungs-Prüfanlage GBS 10/270 für 270 kV/10 mA

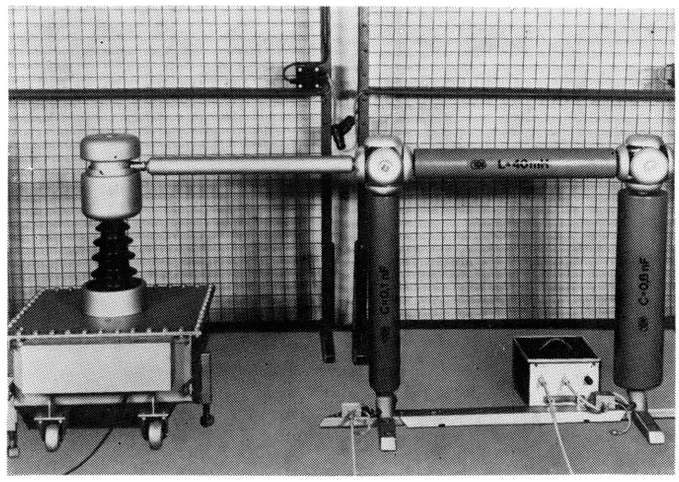


Bild 2. Wechselspannungs-Prüfanlage WBS 4,4/100 TE für TE-Messungen bis 100 kV aus Komponenten des Bausteinsystems

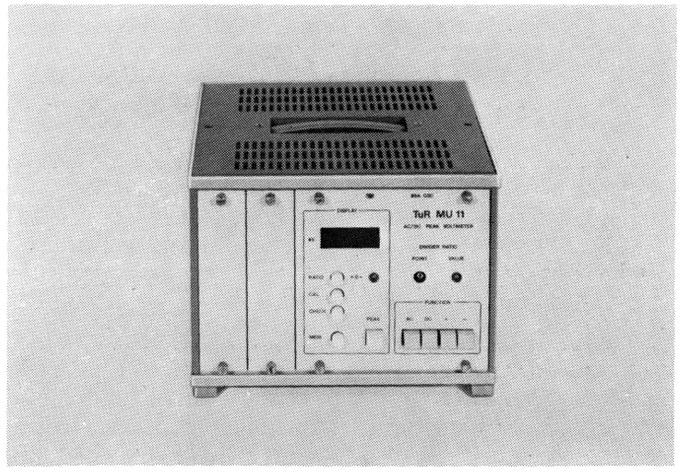


Bild 3. Standard-Scheitelspannungs-Meßgerät MU 11 für das Hochspannungs-Bausteinsystem und separate Anwendungen

- — Messung von Gleich- und Wechselspannung von 10 V bis 1 MV
- — digitale Vorwahl des Teilerverhältnisses (1···999)
- — direkte digitale Anzeige der Hochspannung mit drei Stellen
- — Polarität wählbar
- — bei Wechselspannung (20···1000 Hz) Anzeige des Scheitelwertes $\hat{u}$ oder $\hat{u}/\sqrt{2}$
- — bei Gleichspannung Anzeige des Scheitelwertes $\hat{u}$ oder des Mittelwertes u
- — automatische Meßbereichsumschaltung
- — Funktionskontrolle mit interner Kalibrierspannung

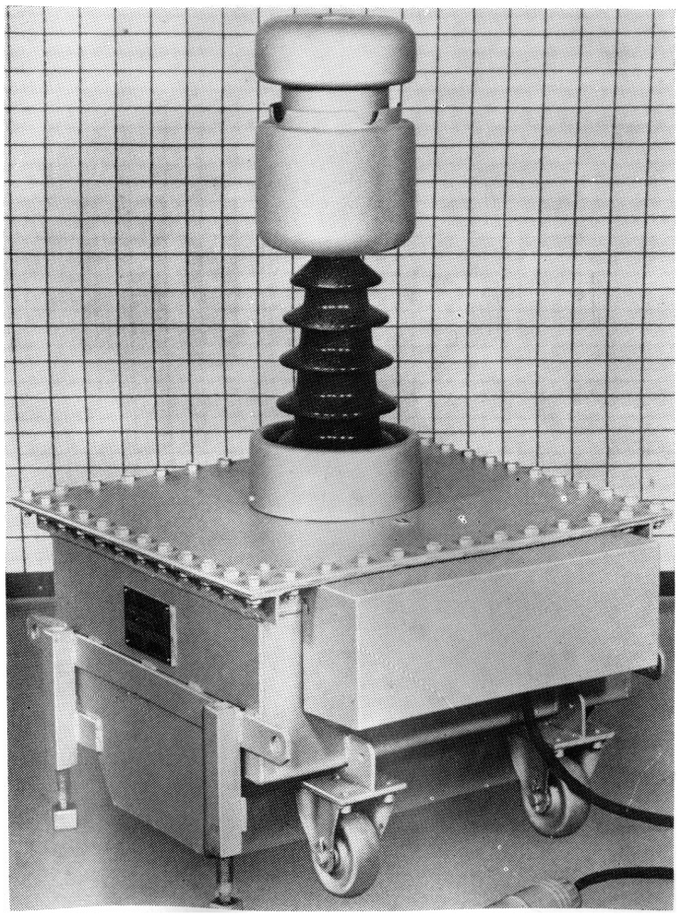


Bild 4. Hochspannungserzeuger T 100 für 100 kV

Sie können komplette Systeme und einzelne Bausteine bestellen.

Ihre Anfragen richten Sie bitte an:

VEB Transformatoren- und Röntgenwerk „Herrmann Matern“
Betrieb des VEB Kombinat Automatisierungsanlagenbau

Overbeckstraße 48
Dresden
8030

Exporteur:
AHB Elektrotechnik Export — Import
Alexanderplatz (Haus der Elektrotechnik)
Berlin
1026

EA 2192

6730 6 173 027 465
KOMB KERAM WERKE
8612 2001 0136 PF 1

ISSN 0013 — 5399
ELEKTRIE · Berlin 40 (1986) 6 · S. 201 — 240

VEB Transformatoren- und Röntgenwerk „Hermann Matern" Dresden Generallieferant kompletter Hochspannungs-Prüffelder

Der industrielle Fortschritt stellt an die Elektrotechnik, speziell an die Übertragungstechnik der Elektroenergie, immer höhere Anforderungen. Die Aufgaben der Forschung und Entwicklung zur Lösung der auftretenden Probleme bei der Übertragung und Verteilung der Elektroenergie wachsen mit den ständig steigenden Übertragungs- und Versorgungsspannungen. Die Spannungsfestigkeit der notwendigen Geräte und Ausrüstungen (wie Transformatoren, Schalter, Kabel, Isolatoren) muß während der Forschung und Entwicklung, in der Produktion, während des Betriebes sowie nach Reparaturen geprüft werden. Darüber hinaus besteht die Notwendigkeit der Ausbildung von Fachkräften auf dem Gebiet der Hochspannungs- und Isoliertechnik.

Diese Aufgaben können nur praxisverbunden in Hochspannungs-Prüffeldern und Hochspannungslaboratorien gelöst werden.

Komplette Hochspannungs-Prüffelder realisiert jetzt der VEB Transformatoren- und Röntgenwerk „Hermann Matern" Dresden. Als langjähriger und international anerkannter Hersteller von Hochspannungs-Prüfanlagen verfügt der VEB TuR Dresden über das erforderliche Wissen und die notwendigen Erfahrungen. Die Realisierung kompletter Hochspannungs-Prüffelder unterstreicht die Leistungsfähigkeit der DDR auf dem Gebiet der Hochspannungs-Prüf- und Meßtechnik.

Die Leistungen des VEB TuR Dresden zum Neubau zur Rekonstruktion oder Erweiterung von Hochspannungs-Prüffeldern für die Industrie sowie für Lehr- und Forschungseinrichtungen umfassen:

- Kundenberatung zur Auswahl der technischen Ausrüstungen
- bautechnische Entwurflösung
- Projektierung und Lieferung der technischen Ausrüstungen
- Lieferung von Know-how
- Montage und Inbetriebnahme aller Lieferungen
- Ausbildung des technischen Prüffeldpersonals
- Übernahme von Garantie- und Serviceleistungen einschließlich der Ersatzteilversorgung.

Zum Lieferumfang der technischen Ausrüstungen gehören:

- Hochspannungs-Prüfanlagen, Prüf- und Meßeinrichtungen
- technische Einrichtungen (wie Hoch- und Niederspannungs-Schalt- und Verteileranlagen, Licht- und Kraftanlagen, Kräne und Hebezeuge usw.)
- Erdungs-, Abschirmungs- und Sicherheitssysteme
- Beregnungs- und Verschmutzungsanlagen
- Praktikumsversuchsstände für eine hochspannungstechnische Ausbildung
- allgemeine Laborausrüstungen (Meßinstrumente, Geräte, Mobiliar)
- Ausrüstungen für zugehörige Speziallabors (z. B. Fotolabor, Öllabor) sowie Werkstätten und Lager.

Der VEB TuR Dresden hat als Generallieferant in den letzten Jahren bereits mehrere Hochspannungs-Prüffelder in verschiedenen Ländern realisiert, unter anderen ein Kabelprüffeld[1]) und ein Transformatorenprüffeld. Weitere Objekte wie z. B. zwei Hochspannungslaboratorien an Universitäten in Europa und Lateinamerika befinden sich in der Realisierungsphase.

Exporteur der Lieferungen und Leistungen des Generallieferanten VEB Transformatoren- und Röntgenwerk „Hermann Matern" Dresden ist der Volkseigene Außenhandelsbetrieb Elektrotechnik Export-Import.

EA 2193

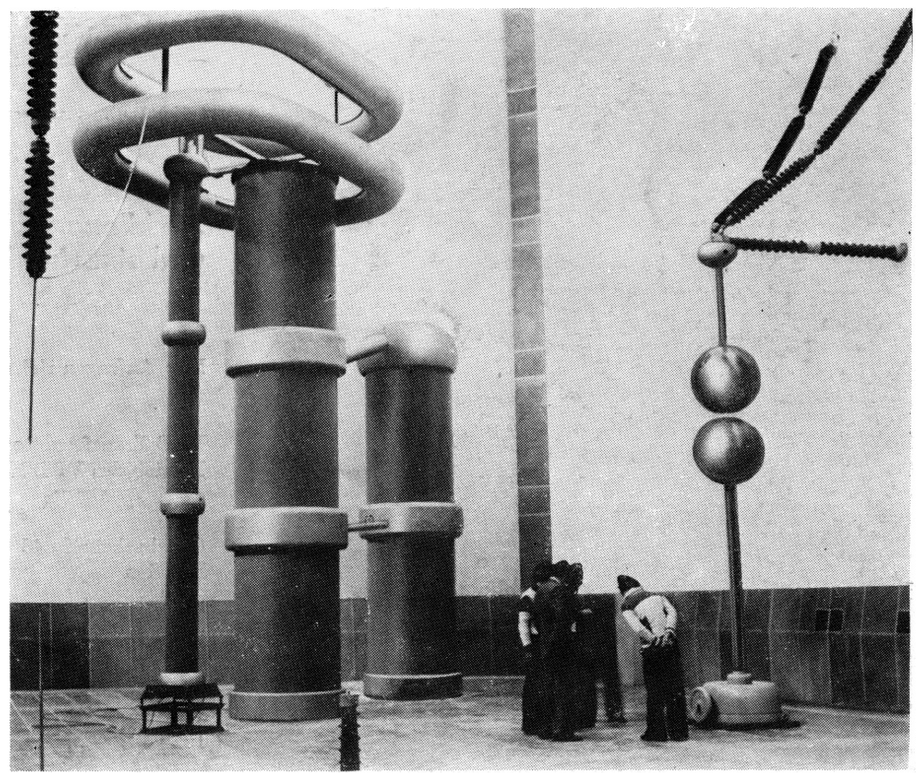


Bild 1. Wechselspannungs-Prüfanlage 1 MV; 0,3 A im Hochspannungslaboratorium der Universität Damaskus/SAR

[1]) Siehe hierzu Beitrag in diesem Heft S. 205—207.